



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VYSOKOTLAKÝ VISKOZIMETR

HIGH PRESSURE VISCOMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ SKALICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. IVAN KŘUPKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Skalický

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vysokotlaký viskozimetr

v anglickém jazyce:

High Pressure Viscometer

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh vysokotlakého viskozimetru s těmito parametry: vysokotlaký viskozimetr pro studium reologických vlastností maziv za vysokých tlaků na principu kuličkového pádového viskozimetru. Konstrukce bude probíhat ve spolupráci s japonskými kolegy, kteří dodají základní výkresovou dokumentaci, která bude upravena a doplněna pro tuzemské podmínky. Jedná se o jedinečné zařízení v celosvětovém měřítku.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Varianty konstrukčního řešení
5. Optimální konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Bibliografie

Forma práce: průvodní zpráva, konstrukční dokumentace, funkční vzorek

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Výstup práce: užitný vzor, průmyslový vzor (F)

Seznam odborné literatury:

1. Bair, S., High-Pressure Rheology for Quantitative Elastohydrodynamics, Elsevier Science, Amsterdam, 2007
2. Bair, S. and Qureshi, F., "The High-Pressure Rheology of Polymer-Oil Solutions", Tribology International, Vol. 36, 2003, pp. 637-645.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí vysokotlakého kuličkového pádového viskozimetru pro měření reologických vlastností kapalin za extrémně vysokých tlaků v širokém rozsahu teplot. Konstrukční řešení vychází z obdobných zařízení popsaných v literatuře. Rychlost propadávajícího tělíska je měřena pomocí dvou optických senzorů. Zařízení umožňuje měření viskozity, hustoty a optické pozorování krystalizace kapaliny. V rámci diplomové práce byl vytvořen rozsáhlý program v prostředí Matlab pro vyhodnocování měření. Hotové zařízení se nachází v laboratoři Ústavu konstruování FSI VUT v Brně a slouží pro vědecko-výzkumnou a tvůrčí činnost.

Klíčová slova: pádový viskozimetr, viskozita, reologie, optické pozorování kapaliny, vysokotlaké zařízení

ABSTRACT

The master's thesis describes design of falling ball high pressure viscometer for measurements of rheological properties of liquids under high pressure and in the wide temperature range. The design is based on similar apparatuses, which are described in literature. The speed of falling sinker is measured by two optical sensors. Apparatus allows measuring of viscosity, density and optical observing structure of liquid. There was developed extensive program for the evaluation of measurement in Matlab. Apparatus is placed in the laboratory of the Institute of Machine and Industrial Design FME BUT and is used for research and creative activities.

Key words: falling-body viscometer, viscosity, rheology, optical observing of liquids, high pressure apparatus

Bibliografická citace:

SKALICKÝ, L. *Vysokotlaký viskozimetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 121 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Prof. Ing. Ivana Křupky, Ph.D., a že jsem v seznamu uvedl všechny literární a odborné zdroje.

V Brně 17. května 2013

Lukáš Skalický

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Ing. Ivanu Křupkovi, Ph.D. a Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za radu a pomoc při řešení diplomové práce, Petru Moravcovi za připomínky k technickému řešení, rodině a manželce za umožnění studia a vytrvalou podporu.

OBSAH

ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 Reologické vlastnosti maziv	14
1.1.1 Změna viskozity kapalin s tlakem a teplotou	14
1.1.2 Změna hustoty maziv s tlakem a teplotou	15
1.2 Vysokotlaké tělískové pádové viskozimetry	16
1.2.1 Princip funkce pádových viskozimetrů	16
1.2.2 Historický vývoj pádových viskozimetrů	19
1.2.3 „High tech“ pádové viskozimetry	21
1.2.4 Konstrukce vysokotlakých zařízení	23
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
2.1 Shrnutí poznatků kritické rešerše	24
2.2 Vymezení cílů diplomové práce	25
2.2.1 Postup řešení	25
3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	26
3.1 Detekce tělísek	26
3.2 Generování tlaku	27
3.3 Tlaková nádoba	28
3.4 Uzávěr tlakové nádoby	29
3.5 Těsnění	30
3.6 Měření hustoty kapaliny	33
4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	36
4.1 Propadávající tělíska a základní rozměry viskozimetru	38
4.2 Vysokotlaká nádoba	41
4.2.1 Výběr materiálů vysokotlakého válce	41
4.2.2 Technologie výroby vysokotlakého válce	41
4.2.3 Koncentrátory napětí	43
4.2.4 Výpočet bezpečnosti vůči překročení meze pevnosti	43
4.2.5 Lisování vysokotlakého válce	50
4.2.6 Vliv teploty a přesnosti výroby na maximální tlak ve válci	51
4.3 Měření tlaku a teploty	53
4.4 Generování a přenos tlaku	55
4.5 Uzávěry tlakové nádoby	58
4.5.1 Konstrukce a těsnění víka	58
4.5.2 Konstrukce a těsnění pozorovacích oken	62
4.6 Vnější konstrukce zařízení a regulace teploty	64
4.7 Analýza rizik	67
4.8 Elektrické obvody	69
4.9 Vyhodnocovací software	72
4.10 Výroba a montáž zařízení	73
5 DISKUZE	77
6 ZÁVĚR	79
BIBLIOGRAFIE	80
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	83
SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	87
SEZNAM PŘÍLOH	89

ÚVOD

V roce 1687 sir Isaac Newton ve svém díle *Principia* zmínil odpor kapaliny umístěné mezi dvěma povrchy, který klade proti jejich vzájemnému pohybu. Zjistil, že zmíněný odpor se lineárně zvyšuje s rostoucí rychlostí relativního pohybu povrchů a s jejich snižující se vzdáleností. Tento odpor se v současné době nazývá smykovým třením kapaliny. Konstanta úměrnosti se nazývá viskozita [1].

$$\tau = \eta \cdot \gamma,$$

kde

τ	Pa	je tečné (smykové) napětí v kapalině,
η	Pa · s	dynamická viskozita,
γ	s ⁻¹	gradient smykové rychlosti (smykový spád).

Viskozita je nejdůležitější vlastností kapalin v oblasti hydrodynamického (HD) a elastohydrodynamického (EHD) mazání [2]. Je silně závislá na tlaku a teplotě. Znalost tlakově-viskozitního chování maziv je nezbytná pro výpočet tření a tloušťky mazacího filmu v mazaných kontaktech [3].

V současné době není chování kapalin za extrémně vysokých tlaků dostatečně přesně popsáno. Viskozita látek musí být vypočtena na základě přibližných vztahů, které mají velmi omezenou platnost, nebo musí být změřena ve vysokotlakém viskozimetru.

Existují dva základní přístupy k měření viskozity [4]:

- Absolutní: Viskozita je vypočtena z uvedeného vztahu na základě měření smykového napětí a gradientu smykové rychlosti.
- Relativní: Viskozita zkoumané kapaliny je určena na základě porovnání s předchozím měřením kapaliny se známou viskozitou. Přesnost zařízení využívajících relativního přístupu je zásadním způsobem ovlivněna přesností kalibrace měřicího přístroje.

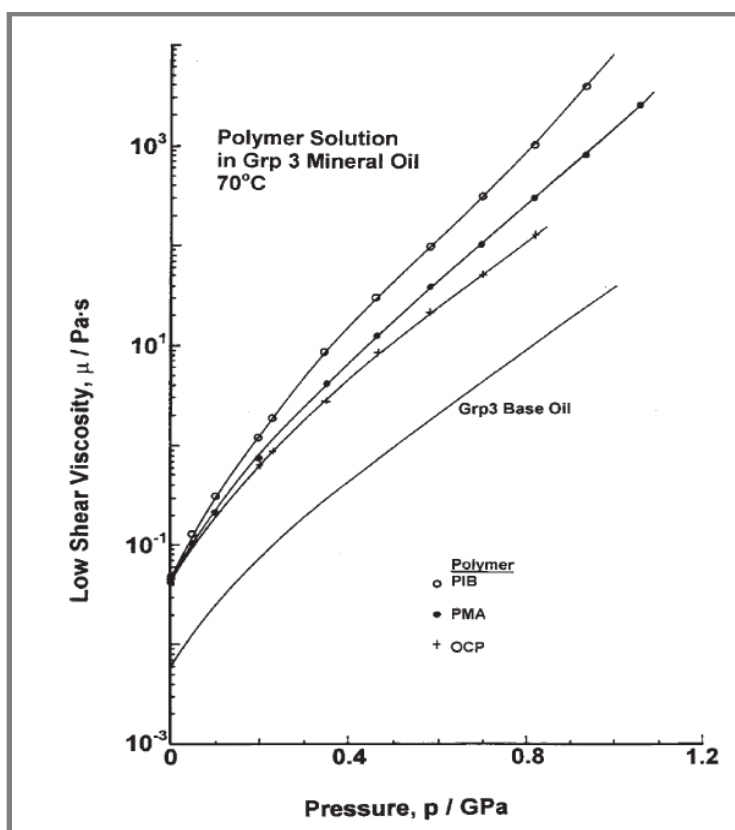
Pro měření viskozity kapalin za vysokých tlaků je v současné době používáno velké množství měřicích přístrojů (viskozimetrů). Níže je uveden jejich prostý výčet, jak uvádí literatura [6], [7].

- Kapilární: rychlost průtoku kapaliny úzkým potrubím
- Tělískové pádové: rychlost pádu tělíska v trubce
- Rotační: odpor kapaliny v mezeře mezi souosými válci
- Vibrační: analýza pomocí Navier-Stokesovy rovnice
- Diamantové buňky: na principu kuličkového valivého viskozimetru

Kapilární a rotační viskozimetry jsou v současné době limitovány maximálním tlakem o velikosti přibližně 0,6 GPa. V diamantových buňkách lze dosáhnout tlaku až 50 GPa, ale pouze za pokojové teploty [6].

Tělískové pádové viskozimetry pro měření viskozity za vysokých tlaků začal P. W. Bridgman používat již v první polovině 20. století [8]. U těchto zařízení je viskozita přímoúměrná času, za který tělísko propadne kapalinou.

První část této diplomové práce popisuje současný stav poznání v oblasti reologie maziv se zaměřením na změnu vlastností s tlakem. Dále je v práci proveden rozbor nejzajímavějších tělískových pádových viskozimetrů. Z jejich konstrukce jsou vyvozeny závěry pro stěžejní část práce. Ta se zabývá konstrukčním návrhem vysokotlakého pádového viskozimetru. Další část je věnována způsobu měření na fyzickém zařízení a vyhodnocovacímu softwaru. V závěru práce jsou uvedeny poznámky ohledně fyzického stavu zařízení v době odevzdání diplomové práce.

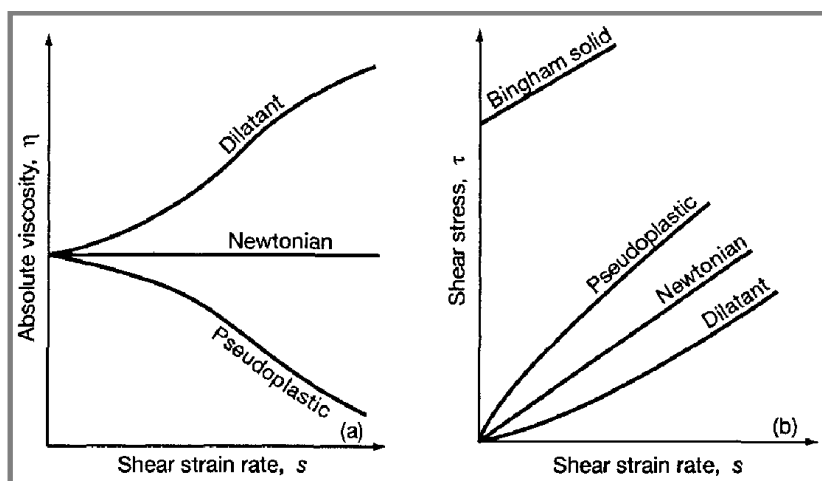


Obr. 0-1 Viskozita minerálního oleje v závislosti na tlaku a přítomnosti polymerů [21]

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Reologické vlastnosti maziv

Reologie je nauka o deformaci a tečení látek, která rozděluje kapaliny na základě závislosti mezi smykovým napětím a smykovým spádem. Newtonovské kapaliny mají tuto závislost lineární. Míra tření v newtonovské kapalině je vyjádřena viskozitou. U neneutronovské kapaliny uvedená závislost není lineární. Viskozita těchto kapalin může být určena, ale je závislá na smykovém spádu.



Obr. 1-1 Definice newtonovské a neneutronovské kapaliny [2]

Viskozita je z reologického hlediska nejdůležitější vlastností kapaliny. Pro EHD mazání je zásadní znát viskozitu maziva při daném tlaku a teplotě. Viskozita kapalin se však s tlakem a teplotou zásadně mění.

1.1.1 Změna viskozity kapalin s tlakem a teplotou

V roce 1893 popsal C. Barus [10] izotermální závislost viskozity na tlaku pomocí exponenciální rovnice:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha' \cdot p},$$

kde η_0 je viskozita kapaliny za atmosférického tlaku, α' je tlakově-viskózní koeficient a p je provozní tlak. Platnost této aproximační rovnice je výrazně omezena maximálním tlakem. V oblasti EHD mazání je prakticky nepoužitelná.

Přesnější aproximace závislosti viskozity na tlaku a teplotě poskytuje vztah, který roku 1966 popsal Roelands [11]:

$$\eta = \eta_0 \exp\{[\ln \eta_0 + 9,67] \cdot [(1 + 5,1 \cdot 10^{-9} \cdot p)^Z - 1]\},$$

kde Z je bezrozměrný viskózně-tlakový index:

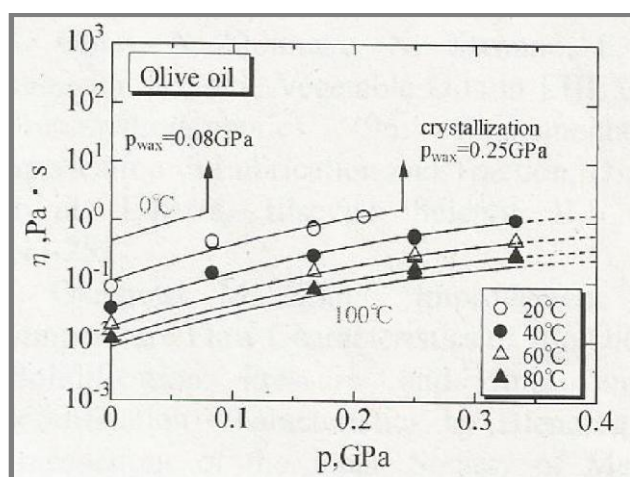
$$Z = \frac{\alpha'}{5,1 \cdot 10^{-9} (\ln \eta_0 + 9,67)}$$

Roelandsův vztah se běžně používá pro simulace EHD mazání. Jeho platnost je omezena tlakem přibližně 0,5 GPa [5].

V současné době existuje více vztahů podstatně složitějších než výše uvedené. Ty poskytují přesnější korelaci mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. Příkladem může být rovnice, kterou vytvořili v roce 1991 Sorab a Vanarsdale [12]:

$$\ln \frac{\eta}{\eta_0} = A_1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) + A_2 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) + A_3 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + A_4 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)^2 + A_5 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right),$$

kde η_0 je viskozita při tlaku $p_0 = 1$ atm a teplotě T_0 (pokožová teplota). Koeficienty A_1, \dots, A_5 charakterizují danou kapalinu. Na obr. 1-2 je ukázána přesnost dané aproximace pro olivový olej. Měření prováděl prof. N. Ohno (2012) [13].



Obr. 1-2 Ukázka aproximace dle Sorab a Vanarsdale [13]

1.1.2 Změna hustoty maziv s tlakem a teplotou

1.1.2

Hustota kapaliny se vlivem změny tlaku a teploty mění obdobně jako viskozita. Při rostoucím tlaku se hustota kapalin zvyšuje. Při rostoucí teplotě naopak klesá vlivem zvětšující se vzdálenosti molekul.

Nárůst hustoty kapaliny s tlakem popisuje rovnice odvozená roku 1962 D. Dowsonem, G. R. Higginsonem a A. V. Whitakerem [14]. Platnost této rovnice je omezena tlakem 0,4 GPa.

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0,6 \cdot 10^{-9} p}{1 + 1,7 \cdot 10^{-9} p} \right),$$

kde ρ_0 je hustota za atmosférického tlaku a p je tlak.

V roce 1987 B. O. Jacobson a A. V. Whitaker [15] odvodili následující vztah platný do tlaku 2,2 GPa:

$$p = 3B_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{2}{3}} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{-1}{3}}\right] \exp \left\{ \eta' \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{-1}{3}}\right] \right\},$$

kde B_0 a η' jsou bezrozměrné konstanty kapaliny.

1.2 Vysokotlaké tělískové pádové viskozimetry

Vysokotlaké viskozimetry slouží k analýze reologických vlastností kapalin při tlacích v řádu stovek MPa. Jako vysokotlaký viskozimetr může sloužit jakékoliv zařízení pro měření viskozity, které odolá vysokým tlakům. Vzhledem ke složitosti konstrukce a těsnění jednotlivých druhů viskozimetrů se pro měření viskozity za tlaků nad 1 GPa používají výhradně tělískové pádové viskozimetry.

Hlavní funkcí vysokotlakých viskozimetrů je měření závislosti viskozity kapaliny na tlaku a teplotě. Způsob konstrukce viskozimetru může také umožňovat měření hustoty kapaliny. Některá zařízení měří závislost viskozity na smykovém napětí. Jiné konstrukce dovolují optické pozorování průběhu krystalizace maziv.

1.2.1 Princip funkce pádových viskozimetrů

Pádové viskozimetry určují viskozitu kapaliny měřením rychlosti tělíska propadávajícího kapalinou. Rychlost tělíska je určena rozdílem hustoty tělíska a kapaliny a mezerou mezi tělískem a stěnou nádoby. Podle druhu tělíska a způsobu uspořádání zařízení rozlišujeme 3 druhy tělískových pádových viskozimetrů.

Padající koule

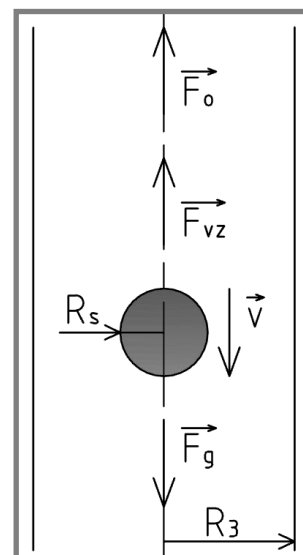
Na kouli volně se pohybující kapalinou ve vertikálním směru působí následující 3 síly (viz obr. 1-3):

- gravitační \vec{F}_g
- odporová \vec{F}_o
- vztlaková \vec{F}_{vz}

V průběhu pádu je velikost F_g a F_{vz} konstantní. Síla F_o se zvětšuje do chvíle, než jsou síly působící na tělísko v rovnováze (než kulička dosáhne konstantní rychlosti).

Velikost odporové síly vychází ze Stokesova zákona pro laminární obtékání těles ve tvaru:

$$F_o = 6\pi\eta R_s v,$$



Obr. 1-3 Padající koule

kde η je viskozita kapaliny. Z rovnice silové rovnováhy je možné přímo spočítat viskozitu kapaliny (za předpokladu známé rychlosti kuličky). Uvedený způsob výpočtu je relevantní pouze při dodržení následujících podmínek [4]:

- Rychlost pádu tělíska je konstantní.
- Setrvačnost kapaliny je zanedbatelná (Reynoldsovo číslo je menší než 0,1).
- Kapalina je newtonovská.
- Vliv stěn nádoby na rychlost kuličky je zanedbatelný ($R_s/R_3 < 0,001$, kde R_3 je vnitřní průměr nádoby).
- Kulička se pohybuje pouze ve vertikálním směru.

Roku 1991 B. O. Jacobson [7] detailně popsal síly působící na kuličku padající kapalinou. Rychlost kuličky padající v uzavřené nádobě je funkcí excentricity pádu. Kulička v průběhu pádu volně rotuje a její trajektorie je náhodná. V roce 2007 S. Bair [6] označil kuličkový pádový viskozimetr jako nepřiliš přesné zařízení pro měření viskozity.

A. Y. Malkin (2006) [4] uvádí korekce pro efekt setrvačnosti, přítomnost stěn a pro newtonovské chování kapaliny. Korekce podstatně zpřesňují přímý výpočet viskozity. Teoreticky vypočtené a experimentálně získané výsledky se přesto liší až o desítky procent. Z tohoto důvodu se kuličkový pádový viskozimetr kalibruje kapalinou se známou viskozitou. Viskozita se následně určuje pomocí rovnice [9]:

$$\eta = C(\rho_1 - \rho_2)t,$$

kde ρ_1 je hustota tělíska, ρ_2 je hustota kapaliny, C je kalibrační konstanta viskozimetru a t je čas, za který tělísko urazí danou vzdálenost.

Přes nepřesnosti způsobené různou trajektorií padající kuličky, je padající kulička často používaným propadávajícím tělískem. Její hlavní výhodou je jednoduchost příslušného zařízení a velký měřitelný rozsah viskozit. Nevýhodou je nutnost provádění většího množství měření pro eliminaci chyby způsobené různou trajektorií a problém s určením smykového napětí v kapalině.

Odvalující se koule

Problém padající koule s náhodnou trajektorií řeší naklonění viskozimetru o určitý úhel. Tím je dosaženo odvalování kuličky po vnitřní stěně vysokotlaké nádoby. Trajektorie kuličky je pak vždy stejná. Základní rozbor sil působících na kuličku je komplikovaný a lze jej najít např. ve zmíněném díle B. O. Jacobsona [7]. Měřitelný rozsah viskozit je obdobný jako u padající koule. U odvalující se koule lze určit velikost smykového napětí v kapalině. Nevýhodou tohoto typu zařízení je jeho složitější konstrukce. Podrobnější popis daného zařízení zde není uveden vzhledem k zadání diplomové práce.

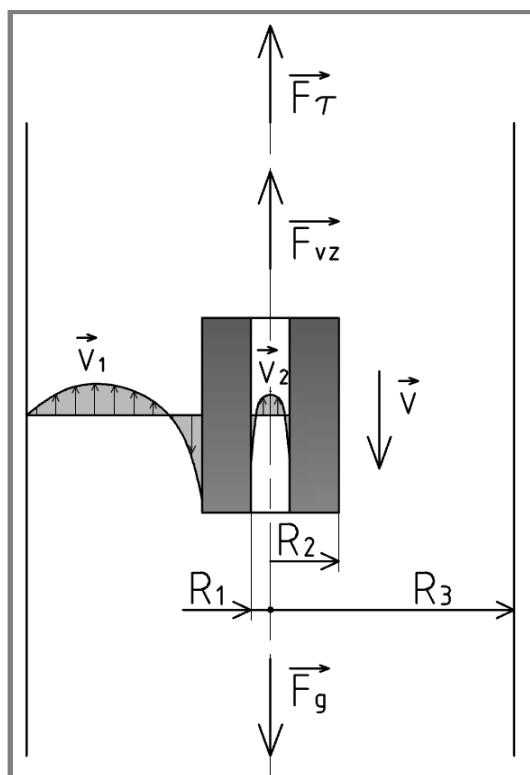
Viscometer type	Lowest viscosity (poise)	Highest viscosity (poise)	Shear-rate range (S^{-1})
Capillary	2×10^{-3}	10^3	1 to 1.5×10^4
Couette	5×10^{-3}	4×10^7	10^{-2} to 10^4
Cone-and-plate	10^{-3}	10^{10}	10^{-4} to 10^3
Brookfield type	10^{-2}	5×10^5	10^{-3} to 10^6
Falling-ball, rolling-ball	10^{-4}	10^4	Indeterminate

Obr. 1-4 Přehled některých typů viskozimetrů [1]

Padající válec

Posledním typem propadávajících tělísek je válec. U padající koule je nutná velká mezera mezi tělískem a stěnou viskozimetru, u padajícího válce tomu je naopak. Pád válce v uzavřené nádobě vysokotlakého viskozimetru způsobuje zpětný tok kapaliny. Její rychlostní profil je na obr. 1-5. Síly působící na válec propadávající kapalinou jsou obdobné jako u propadávající koule [24]:

- gravitační \vec{F}_g
- smyková \vec{F}_τ
- vztlačková \vec{F}_{vz}



Obr. 1-5 Propadávající válec s axiálním otvorem

Velikost smykové síly F_τ je dána rychlostním profilem kapaliny proudící mezerou mezi válcem a stěnou nádoby v_1 , případně i axiálním otvorem v_2 (nemusí být přítomen).

J. B. Irving a A. J. Barlow v roce 1971 [16] vyčíslili z Navier-Stokesovy rovnice velikost smykových sil a na základě silové rovnováhy odvodili následující vztah mezi rychlostí válce a viskozitou kapaliny:

$$2v\eta = (\rho_1 - \rho_2)(R_2^2 - R_1^2)g \cdot \frac{\ln \frac{R_3}{R_2} - (R_3^2 - R_2^2)^2}{R_3^4 - R_2^4 + R_1^4},$$

kde ρ_1 je hustota válce, ρ_2 je hustota kapaliny a g je gravitační zrychlení.

V roce 1972 J. B. Irving [20] analyticky popsal vliv naklonění viskozimetru na rychlost tělíska. Při naklonění dochází k rychlejšímu pádu tělíska. Z uvedené práce

vyplývá nutnost mechanického nebo hydrodynamického středění tělíska v trubce, aby platila výše uvedená rovnice.

Výhodou propadávajícího válce je jeho konstantní trajektorie a přesnější měření závislosti viskozity na smykovém napětí. Nevýhodou je vyšší cena tělísek a menší měřitelný rozsah viskozit pro určité tělísko.

Ačkoli velikost smykového napětí v kapalině lze přesně vyčíslit, koncové efekty na hranách válce jsou zanedbávány. Padající válec proto nemůže být použit pro přímé měření viskozity a musí být kalibrován.

Pro výpočet viskozity se používá zcela identický vztah jako u propadávající kuličky:

$$\eta = C(\rho_1 - \rho_2)t,$$

s rozdílem, že u propadávajícího válce lze konstantu C přibližně spočítat:

$$C = \frac{g}{2L} \cdot \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{R_3^4 - R_2^4 + R_1^4} \cdot \left[(R_3^4 - R_2^4 + R_1^4) \cdot \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) - (R_3^2 - R_2^2)^2 \right],$$

kde L je vzálenost, na které se měří čas t . Uvedené vztahy se využívají pro návrh viskozimetrů.

Pouze několik autorů uvádí přesné rozměry propadávajících tělísek. Průměr válcového tělíska je obvykle v rozmezí 5 až 11 mm. Hydrodynamické středění propadávajícího válce je zajištěno, pokud poměr průměrů tělíska a trubky je větší než 0,93 [16].

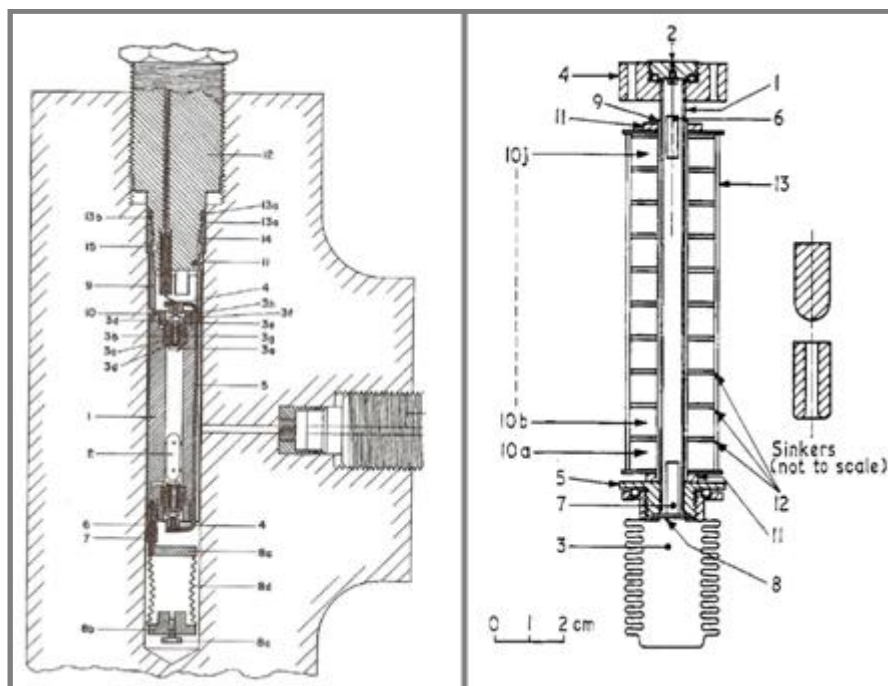
Všichni autoři shodně zavádějí korekci hustoty tělíska vlivem teploty a tlaku. J. M. Paton a C. J. Schaske (2009) [22] na základě měření a MKP simulací doporučují korekci kalibrační konstanty vlivem Reynoldsova čísla.

1.2.2 Historický vývoj pádových viskozimetrů

1.2.2

Jeden z prvních vysokotlakých pádových viskozimetrů zkonstruoval v první polovině 20. století P. W. Bridgman [9] (viz obr. 1-6 vlevo). Jako propadávající tělísko použil válec. Doba pádu tělíska byla měřena spínáním elektrických kontaktů na koncích vysokotlaké nádoby. V krajních polohách bylo tělísko drženo elektromagnetem, celým viskozimetrem bylo možné otočit pro resetování polohy tělíska.

O výrazné vylepšení konceptu Bridgmanova zařízení se postarali J. B. Irving a A. B. Barlow [16] (viz obr. 1-6 vpravo). Detekci tělíska zajišťovalo 9 cívek navinutých kolem viskozimetru. Propadávající tělíska indukovala v cívkách napětí. Při dosažení konstantní rychlosti tělíska se měření ukončilo. Celý proces měření byl automatizován. Zařízení provedlo požadovaný počet měření bez zásahu obsluhy. Tělísko bylo vráceno do původní polohy pomocí detekčních cívek, kterými procházel proud. Nevýhodou využívání elektromagnetické indukce pro zvedání tělíska, bylo zahřívání celého zařízení.



Obr. 1-6 Vysokotlaký viskozimetr, P. W. Bridgman [9], J. B. Irving a A. B. Barlow [16]

Při vysokých viskozitách rapidně klesá rychlost tělíska. Podstatnou výhodou by bylo spojitě měření rychlosti tělíska. R. K. Chan a D. A. Jackson v roce 1985 [17] popsali využití Dopplerova jevu pro měření rychlosti tělíska. Viskozimetr byl automatický a vylepšoval zařízení sestavené roku 1980 (Jackson, Dandridge [19]).

Výše zmíněný koncept Irvinga a Barlowa upravil R. J. McLachlan [18]. Pro detekci tělíska použil lineární variabilní diferenční transformátor (LVDT). Rychlost tělíska byla měřena spojitě a byl odstraněn problém se změnou indexu lomu kapaliny s tlakem.

V roce 2007 sestavil C. J. Schaschke [23] nový viskozimetr. Zařízení má jednoduchou konstrukci, detekci tělíska zajišťují dvě cívky. Autor provedl řadu MKP výpočtů proudění kapaliny kolem válcového tělíska a zavedl úpravu kalibrace podle Reynoldsova čísla.

Tab. 1-1 Parametry vysokotlakých pádových viskozimetrů

Autor	Měřitelný rozsah		Max. tlak (MPa)
	Min (Pa · s)	Max (Pa · s)	
Bridgman	0,01	500	1 200
Irving, Barlow	0,01	3 000	1 400
Jackson, Chan	0,1	10^6	300
McLachlan	300	10^6	neuvedeno
Schaschke	neuvedeno	neuvedeno	1 000
Ohno	0,001	1 000	300
Bair	0,003	10^5	1 400

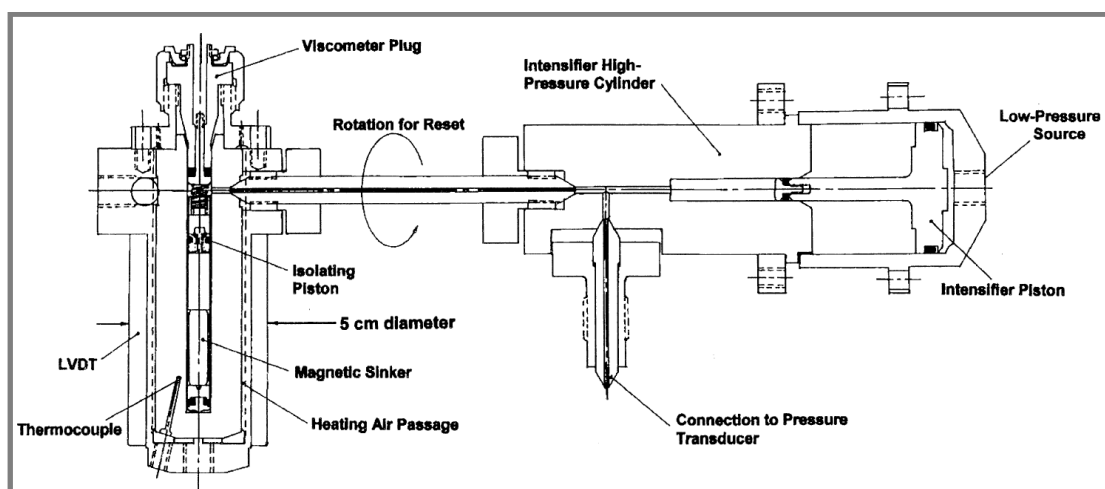
1.2.3 „High tech“ pádové viskozimetry

Tato kapitola podrobněji popisuje dva vybrané viskozimetry, které jsou nejdůležitější pro návrh nového vysokotlakého viskozimetru.

Scott Bair, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia [3], [5], [6]

Tento vysokotlaký viskozimetr pracuje na principu válcového pádového viskozimetru. Pro měření jsou používána dvě válcová tělíska s axiální dírou a bez díry. Tělísko bez díry je vyrobeno ze železa, druhé tělísko má tantalovou vložku pro zvýšení rychlosti. Válečky mají 4 oka zajišťující koncentrické vedení. Přesné rozměry tělísek nejsou uvedeny.

Průřez celým zařízením je znázorněn na obr. 1-7. Zařízení se skládá ze dvou hlavních částí. Samotný vysokotlaký viskozimetr je v levé části obrázku. Je tvořen ocelovým válcem vyrobeným technologií „autofritáže“ (viz varianty řešení). Válec je utěsněn zástrčkou přidržovanou šrouby.



Obr. 1-7 Vysokotlaký viskozimetr, autor: Scott Bair [3]

Konstantní teplotu ve válci zajišťuje vzduch proudící kolem vnějšího pláště vysokotlaké nádoby. Teplota je měřena termočlánkem, který se nenachází přímo v kapalině. Detekce polohy tělíska probíhá spojitě pomocí LVDT. Hydraulické médium je do válce přiváděno ze zesilovače. Aby nedošlo ke smíchání hydraulické a zkoumané kapaliny, jsou odděleny pohyblivým izolujícím pístem.

Hlavním prvkem zesilovače je píst, který má dva průměry. Na větší z nich působí hydraulická kapalina z ruční pumpy, menší průměr následně vytváří požadovaný vysoký tlak. Viskozimetr a zesilovač jsou spojeny tenkou vysokotlakou trubicí. Celým zařízením je možné otočit kolem osy zesilovače. Tím je tělísko navraceno do původní polohy.

Měření tlaku je prováděno nepřímou metodou pomocí kalibrace, neboť izolační píst způsobuje tlakové ztráty. Chyba nepřímého měření tlaku nepřekračuje 1 %.

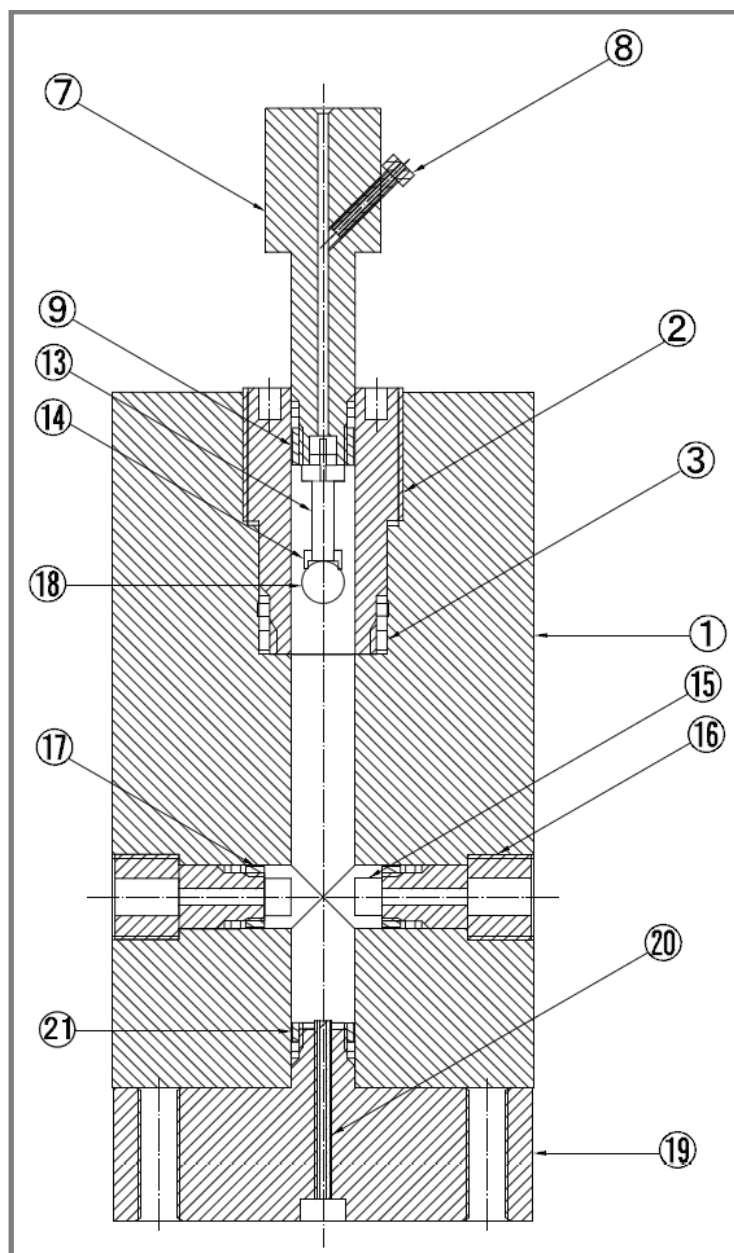
Tento viskozimetr je malé, poměrně kompaktní zařízení. Díky použití izolačního pístu je potřebné množství zkoumané kapaliny přibližně 2 ml. Konstrukce zařízení

umožňuje relativně rychlou výměnu pozorované kapaliny. Mechanické středění způsobuje problémy při vyšších viskozitách, při nižších je naopak výhodnější. Díky spojitému pozorování kapaliny lze měřit i extrémně vysoké viskozity. Zařízení neumožňuje měření hustoty kapaliny.

Nobuyoshi Ohno, Saga University, Japan

Autor diplomové práce tento viskozimetr osobně viděl a prováděl na něm měření viskozity. Zde uvedený popis zařízení vychází z literatury ([13], [25]), osobních konzultací a vlastních zkušeností.

Viskozimetr funguje na principu kuličkového pádového viskozimetru. Parametry zařízení jsou popsány v tab. 1-1.



Obr. 1-8 Vysokotlaký viskozimetr, autor: Nobuyoshi Ohno [13]

Průřez zařízením je zobrazen na obr. 1-8. Tlak je generován hydraulickým lisem působícím na součásti 7 a 19. Zástrčka (7) se zasouvá do vysokotlaké nádoby (1). V zástrčce je axiální otvor, kterým odchází vzduch na začátku zatěžování. Při samotném měření je otvor izolován plastelínou. Tlak v zařízení je vypočítán ze zátěžné síly hydraulického lisu.

Propadávajícím tělískem je kulička o průměru 8 mm (18). Ta je na začátku měření držena elektromagnetem (13). Jakmile je ve viskozimetru dosaženo požadovaného tlaku, elektromagnet se vypne a kulička padá.

V dolní části vysokotlaké nádoby je radiální průzor tvořený dvojicí zašroubovaných čepů se safírovými skly. Skrze průzor prochází světelný paprsek. Rychlost kuličky se určuje od jejího průměru a doby přerušení světelného paprsku. Po pádu kuličky musí být vrchní zástrčka vyjmuta, kulička připevněna zpět na elektromagnet a v zařízení se musí znovu vyvinout požadovaný tlak.

Jako těsnění je použito kombinace o-kroužku, teflonového kroužku a kroužku z beriliového bronzu. Safírová skla jsou pouze přilepena běžným akrylátovým lepidlem. Otvory pro vodiče obsluhující elektromagnet (8) a termočlánek (21) jsou izolovány epoxidovou pryskyřicí.

Konstantní teplotu uvnitř viskozimetru zajišťuje oběhové temperační čerpadlo. Kapalina o požadované teplotě se přivádí do dvouplášťového válce nasunutého na viskozimetr. Teplota je měřena pomocí termočlánu v dolní zástrčce. Jeho „studený konec“ je umístěn v termosce, ve které je voda s ledem (0 °C).

Hlavní výhodou tohoto zařízení je jednoduchost, snadná údržba a nízká cena. Omezením je relativně nízký maximální tlak (0,3 GPa) a neúměrně dlouhá doba přípravy každého pádu tělíska (přibližně hodina). Po každém měření se musí doplnit kapalina. Zařízení umožňuje přímé pozorování krystalizace kapalin a měření hustoty.

1.2.4 Konstrukce vysokotlakých zařízení

1.2.4

Problematika konstrukce vysokotlakých zařízení je velmi obsáhlá. Mnoho autorů vysokotlakých viskozimetrů považuje následující díla za stěžejní:

- P. W. Bridgman: *The physics of high pressure* [8],
- E. W. Comings: *High pressure technology* [27],
- M. I. Eremets: *High pressure experimental methods* [28],
- W. F. Sherman, A. A. Stadtmuller: *Experimental Techniques in High-Pressure Research* [29] ,
- Ch. W. Macosko: *Rheology* [26].

Vzhledem k rozsahu rešeršní části práce není možné zde uvádět kompletní přehled současného stavu poznání v této oblasti a nemá význam uvádět pouze část. Zmíněná literatura byla autorem diplomové práce prostudována a konstrukční část práce z velké části vychází z poznatků z literatury.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Shrnutí poznatků kritické rešerše

V současné době neexistují teoretické modely přesně popisující tlakově-viskózní chování kapalin za extrémních tlaků. Pro určení závislosti viskozity na tlaku a teplotě je stěžejní experimentální přístup. Nejvhodnějšími zařízeními pro měření viskozity při různých teplotách a extrémních tlacích jsou pádové viskozimetry.

Studie zabývající se pádovými viskozimetry lze rozdělit do dvou kategorií na teoretické a experimentální. Teoretické články se zabývají především obtékáním propadávajícího tělíska. Pomocí analytických výpočtů a MKP simulací jsou do přímého výpočtu viskozity z rychlosti tělíska zaváděny korekce, které mají teoretický model přiblížit skutečnosti. Experimentálně zaměřené články popisují konstrukci viskozimetrů a způsoby co nejjednodušší kalibrace tělíska.

Studium odborné literatury přineslo několik poznatků důležitých pro konstrukci viskozimetru a měření viskozity:

- Pro přesné měření viskozity je nutné znát rozdíl hustoty tělíska a kapaliny při daném tlaku a teplotě.
- Viskozitu nelze měřit přímo, ale musí se vypočítat z předchozí kalibrace.
- Závislost viskozity na smykovém napětí lze měřit, pokud je propadávajícím tělískem válec nebo odvalující se kulička.
- Kulička propadávající kapalinou se nepohybuje pouze vertikálně.
- Válec propadávající kapalinou se pohybuje vertikálně, pokud je poměr jeho vnějšího průměru a vnitřního průměru trubky alespoň 0,93.
- Válcové tělísko má mít poměr délky a průměru alespoň 1,4.
- Naklonění viskozimetru má podstatný vliv na rychlost tělíska.
- Způsob detekce polohy tělíska výrazně ovlivňuje měřitelný rozsah viskozity a dobu měření.
- Kalibrační konstanta kuličky může být považována za konstantní, jestliže je známa aktuální hustota kuličky a kapaliny.
- Kalibrační konstanta válce nemůže být považována za konstantní. Konstanta musí být upravována podle skutečných rozměrů tělíska a trubky.
- Deformace tlakové nádoby vlivem tlaku a teploty nejsou zanedbatelné z hlediska objemu kapaliny a výpočtu smykového napětí.
- Deformace tělíska nejsou zanedbatelné z hlediska jeho hustoty.
- Teplota kapaliny nemůže být měřena odporovým čidlem, neboť jeho elektrický odpor se mění s tlakem.
- Jednoduchá válcová nádoba je schopna vydržet tlak rovný přibližně polovině meze pevnosti materiálu.
- Napětí v materiálu tlakové nádoby může v jistých případech překračovat mez kluzu materiálu.
- Tlakové obvodové napětí na vnitřním povrchu tlakové nádoby může podstatně zvýšit maximální tlak ve viskozimetru.
- Nejnebezpečnější složkou napětí je jeho obvodová složka. Nebezpečným místem nemusí být vnitřní povrch tlakové nádoby.

- Radiální otvor ovlivňuje pouze obvodové a axiální napětí. Součinitel koncentrace napětí není vyšší než 2,5.
- Tlakové nádoby některých vysokotlakých viskozimetrů jsou konstruovány s bezpečností 1. Případné strukturní vady (nebo jiné odchylky od předpokládaných vlastností) zpravidla způsobí destrukci nádoby.
- Vzhledem k vysokému tlaku a způsobu dimenzování tlakové nádoby, musí být okolní prostor zabezpečen proti případné explozi.
- Při tlaku v řádech GPa se může kapalina stlačit až na polovinu svého původního objemu.
- Tlakové ztráty v těsnění rostou s tlakem přibližně lineárně.

2.2 Vymezení cílů diplomové práce

2.2

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh a realizace vysokotlakého viskozimetru na principu kuličkového pádového viskozimetru pro studium reologických vlastností maziv za vysokých tlaků. Konstrukce probíhala ve spolupráci s japonskými kolegy, kteří poskytli základní výkresovou dokumentaci.

Dosažení cíle diplomové práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- návrh vysokotlakého viskozimetru,
- fyzická realizace vysokotlakého viskozimetru,
- návrh měřicího řetězce a vyhodnocovacího softwaru,
- fyzická realizace měřicího řetězce a vyhodnocovacího softwaru,
- kalibrace zařízení podle [21],
- provedení měření a vyhodnocení získaných výsledků.

Vysokotlaký viskozimetr má splňovat níže uvedené parametry:

- maximální tlak v kapalině 1,5 GPa,
- nastavitelná teplota kapaliny v rozsahu -30 až 120 °C,
- měřitelný rozsah viskozity od 0,01 do 1 000 Pa·s,
- měření hustoty kapaliny,
- možnost optického pozorování kapaliny.

2.2.1 Postup řešení

2.2.1

Pro splnění cíle diplomové práce byl vypracován postup řešení tak, aby byla práce co nejefektivnější.

- 1) konstrukční návrh viskozimetru,
 - a) princip měření, sledování polohy tělíska, propadávající tělíska,
 - b) způsob generování a přenosu tlaku,
 - c) měření tlaku, teploty a hustoty,
 - d) vysokotlaká nádoba, těsnění a uzávěry,
 - e) regulace teploty, vnější konstrukce,
- 2) zajištění výroby viskozimetru, nákup součástí,
- 3) tvorba softwaru a elektrických obvodů,
- 4) zprovoznění zařízení, kalibrace, ověřovací měření.

3 VARIANTY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Tato kapitola se zabývá jednotlivými variantami konstrukčního řešení. Podrobný popis měřicího řetězce a vyhodnocovacího softwaru je uveden v následující kapitole a přílohách. Varianty řešení řetězce a softwaru nejsou v práci uvedeny s ohledem na hlavní cíl a pro zachování přijatelné délky diplomové práce.

Vysokotlaký viskozimetr se skládá z většího množství konstrukčních uzlů. Konstrukční varianty mohou vzniknout jejich různou kombinací. Níže je uveden podrobnější rozbor jednotlivých částí zařízení:

- detekce tělísek,
- generování tlaku,
- tlaková nádoba,
- uzávěry tlakové nádoby,
- těsnění,
- měření hustoty kapaliny.

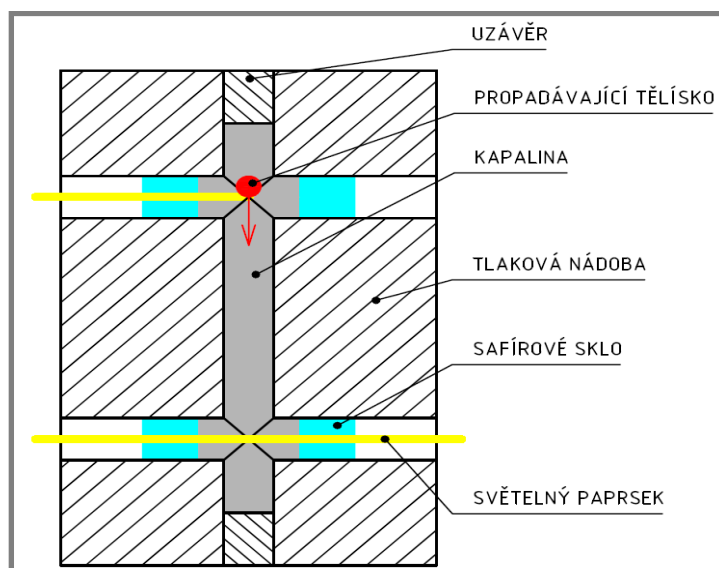
Ve výpočtech v této kapitole jsou použity skutečné rozměry viskozimetru (viz následující kapitola).

3.1 Detekce tělísek

Měření rychlosti tělísek lze provádět dvěma základními způsoby:

- **Spojitě měření:** rychlost tělíska je známa v každém okamžiku pádu
 - kratší doba měření
 - vyšší maximální měřitelná viskozita
 - tlaková nádoba bez radiálních otvorů
 - **laserový paprsek:** využívá laseru a Dopplerova jevu
 - problém se změnou indexu lomu kapaliny s tlakem a teplotou
 - nutnost speciálního uzávěru válce
 - **LVDT:** lineární variabilní diferenční transformátor okolo přístroje
 - nemagnetická tlaková nádoba, magnetické tělísko
 - nejsložitější vyhodnocovací algoritmus
 - obtížnější temperace viskozimetru
- **Diskrétní měření:** rychlost tělíska je určována v několika bodech
 - jednodušší princip měření a vyhodnocování viskozity
 - delší doba měření, nižší maximální viskozita, nižší pořizovací náklady
 - **indukční závory:** cívky navinuté okolo přístroje
 - nemagnetická tlaková nádoba, magnetické tělísko
 - obtížnější temperace viskozimetru
 - **optické závory:** radiální světelné paprsky (viz obr. 3-1)
 - možnost optického pozorování kapaliny
 - koncentrace napětí vlivem radiálních otvorů
 - vyšší riziko úniku vysokotlaké kapaliny

Vzhledem k jednoduchosti vyhodnocování rychlosti tělíska a pro současné zajištění možnosti optického pozorování kapaliny, byla vybrána možnost diskrétního měření pomocí optických závor.



Obr. 3-1 Princip funkce optických závor

3.2 Generování tlaku

3.2

Základním principem generování tlaku je vtlačování pístu do vysokotlaké nádoby. Některé způsoby vyžadují použití zesilovače.

- **Hydraulický lis:** viskozimetr je stlačován v lisu (viz obr. 1-8)
 - zařízení je vázáno na umístění hydraulického lisu
 - viskozimetrem nemůže být otáčeno pro resetování polohy tělíska
 - jednoduchá konstrukce, nemusí být použit zesilovač
 - nemusí být použita hydraulická kapalina
 - tlak je počítán ze zatěžovací síly hydraulického lisu
- **Hydraulická ruční pumpa:** vyvolaný tlak až 70 MPa (viz obr. 1-7)
 - vzhledem k nízkému tlaku musí být použit zesilovač
 - zařízením se může otáčet, pumpu lze odpojit
 - pumpa bývá vybavena manometrem

$$P_z = P_1 \cdot \frac{D_1}{D_z} = 1\,500 \text{ MPa} \cdot \frac{14^2}{75^2} \text{ mm}^2 = 52 \text{ MPa},$$

kde P_z je tlak v zesilovači, P_1 je požadovaný tlak ve viskozimetru, D_1 je průměr pístu viskozimetru a D_z je průměr pístu zesilovače.

- **Pohybový šroub:** píst je zatlačován ručně ovládaným šroubem
 - snadná kontrola posunutí pístu
 - velké rozměry, mohutnost a konstrukční složitost zařízení

$$F_1 = P_1 \cdot S_1 = P_1 \cdot \frac{\pi D_1^2}{4} = 1\,500 \text{ MPa} \cdot \frac{\pi \cdot 14^2}{4} \text{ mm}^2 = 230 \text{ kN},$$

kde F_1 je síla působící na šroub a S_1 je obsah pístu viskozimetru.

Vzhledem k pomalému, nepříliš častému zatěžování je maximální povolený tlak v závitech metrického pohybového šroubu v kontaktu ocel-ocel stanoven na 75 MPa.

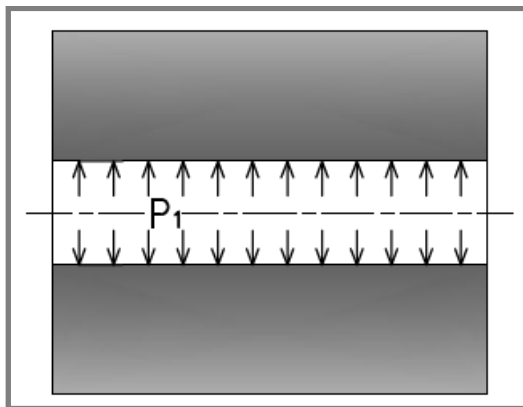
$$p_s = \frac{2F_1}{\pi \cdot d_m \cdot L_m} = \frac{2 \cdot 230 \text{ kN}}{\pi \cdot 0,046 \cdot 0,064 \text{ m}} = 50 \text{ MPa},$$

kde p_s je tlak v závitech, d_m je střední průměr závitu a L_m je délka matice. Při bezpečnosti 1,5 vůči otlacení závitu M48x3, musí být délka matice 64 mm.

Hydraulický lis nebyl vybrán kvůli nutnosti vázat viskozimetr na externí nepohyblivé zařízení. Pohybový šroub je nevýhodný vzhledem k požadované síle. Pro generování tlaku bude použita ruční hydraulická pumpa. Maximální tlak generovaný vybranou pumpou je 70 MPa a proto bude zařazen zesilovač tlaku.

3.3 Tlaková nádoba

Tlaková nádoba je nejdůležitějším prvkem vysokotlakého viskozimetru. Jednoduchý monolitický silnostěnný válec zatížený tlakem na vnitřním povrchu (obr. 3-2) vydrží tlak rovný přibližně polovině meze pevnosti použitého materiálu. Nejnebezpečnějším napětím z hlediska prasknutí válce je obvodové napětí. Maximální povolený tlak ve válci může být téměř zdvojnásoben specifickou konstrukcí nebo způsobem výroby.

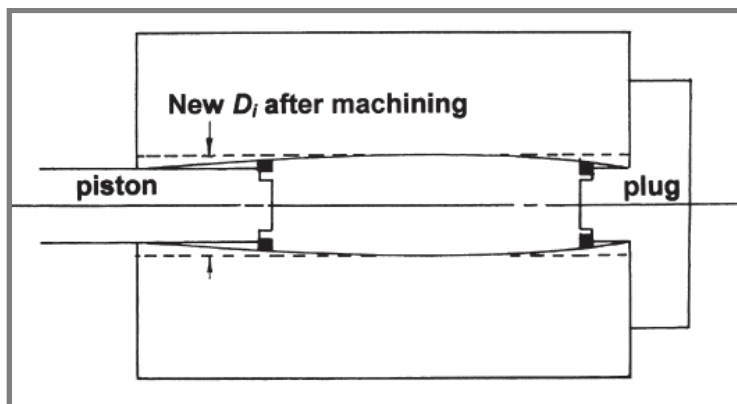


Obr. 3-2 Silnostěnný válec zatížený tlakem na vnitřním povrchu

Dva níže uvedené postupy zajistí, že na vnitřní povrch válce v nezatíženém stavu bude působit obvodové tlakové napětí.

- **Autofritáž:** Ve válci je hydraulickým lisem stlačována kapalina. Jakmile dojde k jejímu úniku vlivem deformace válce, jeho vnitřní povrch se přebrousí na nový maximální průměr. Následně jsou vyrobeny nové čepy a těsnění a proces probíhá znovu. Vlivem silného zatěžování dochází k plastické deformaci válce. Po odlehčení zůstanou na vnitřním povrchu tlaková napětí.

- vyšší maximální tlak v tlakové nádobě
- složitá a nákladná výroba (nutno provést více než 5 cyklů)
- obvykle těžko obrobitelný materiál



Obr. 3-3 Proces autofritáže [6]

- **Lisování:** Tlakové obvodové napětí je vyvoláno nalisováním dvou, anebo více souosých válců. V prostředních válcích může být opakovaně překračována mez kluzu materiálu (pokud jsou alespoň 3 válce).
 - možnost využití materiálů s extrémně vysokou mezí pevností v tlaku
 - složité výpočty, větší průměr vnějšího válce.
 - lisování je výhodnější než autofritáž pouze v případě, že lisované válce nejsou ze stejného materiálu
 - porušení vnějšího válce je velmi nebezpečné
 - válec může negativně reagovat na změny teplot
 - může být provedena autofritáž, ale nemusí mít podstatný efekt

Uvedené způsoby konstrukce vysokotlakého válce nejsou jediné. Další způsoby (válec s proměnnou vnější podporou, „vinutý“ válec, sektorový válec) nebyly podrobněji uvažovány pro extrémní konstrukční složitost a zvolený způsob detekce tělísek. Dva výše popsané způsoby dostatečně splňují požadavky zadání (viz následující kapitola).

Po konzultaci s japonskými odborníky bude vysokotlaký válec vyroben metodou lisování (zejména s ohledem na náklady). Na základě pevnostních a tepelných výpočtů (viz následující kapitola) budou použity 3 ocelové vnější válce. Vnitřní válec bude z karbidu wolframu. Vnější průměr tlakové nádoby je 150 mm.

3.4 Uzávěr tlakové nádoby

3.4

Uzávěr tlakové nádoby musí být co nejjednodušší a dostatečně pevný. Musí umožňovat bezproblémové těsnění kapaliny a přívod vodičů do vnitřního prostoru viskozimetru. V konstruovaném zařízení je důležitý uzávěr na čele válce (čep o průměru 14 mm, působící síla 230 kN). Obdobné uzávěry jsou i v radiálních otvorech pro optickou detekci tělísek (čepy o průměru 12 mm, působící síla 170 kN). U radiálních otvorů není více variant konstrukčního řešení.

Uzávěr na čele válce může být realizován dvěma způsoby, anebo jejich kombinací:

- **Víko držené šrouby**
 - víko musí být drženo deseti šrouby M14x1,5 pevnostní třídy 10.9 při délce zašroubování 20 mm (výpočet viz následující kapitola)
 - obtížnější a delší montáž, víko musí být vedeno kolíky
- **Čep šroubovaný do válce:** dovolený tlak v závitech je 200 MPa
 - z výše uvedeného výpočtu vyplývá, že bezpečnost závitu M48x3 vůči otlačení je 2, pokud funkční délka závitu je 32 mm.
 - podstatné zvětšení délky vysokotlakého válce
 - větší odírání těsnění v průběhu montáže
- **Čep šroubovaný do víka:** kombinace výše uvedených způsobů znamená jednodušší montáž (šroubovaný čep) a válec není zbytečně prodlužován
 - vysoká hmotnost víka, vyšší náklady

Prodloužení vysokotlakého válce použitím šroubovaného čepu znamená podstatné zvýšení nákladů na obrábění (tvrdé nástrojové oceli, karbid wolframu). Pro získání nejjednodušší možné konstrukce bude použito víko držené šrouby. V případě problémové manipulace s těžkým víkem, může být navržené víko použito i pro třetí variantu.

3.5 Těsnění

Vzhledem ke konstrukci a principu měření se ve vysokotlakém válci bude vyskytovat 5 druhů vysokotlakých těsnění:

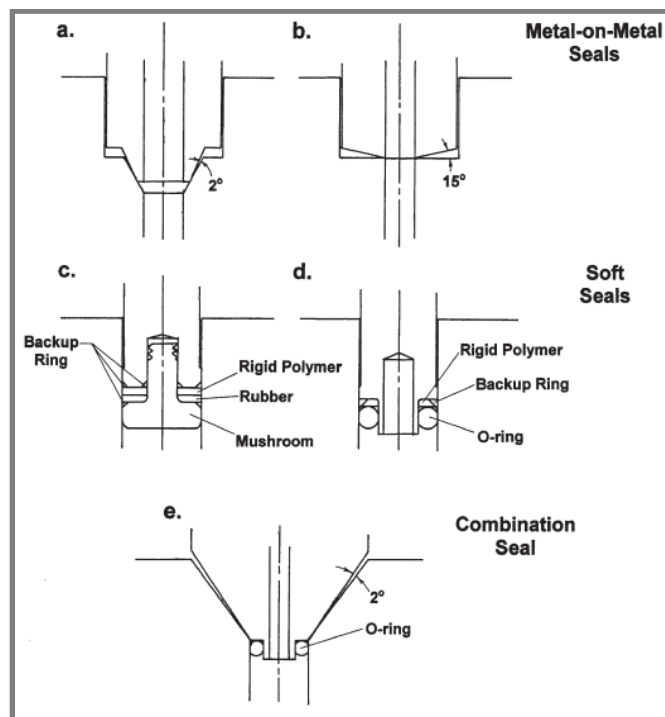
a) Těsnění mezi válcem a čepem

- základní těsnění vyskytující se v zařízení na pěti místech
- nemá neomezenou životnost, musí se porušit dříve než vysokotlaký válec

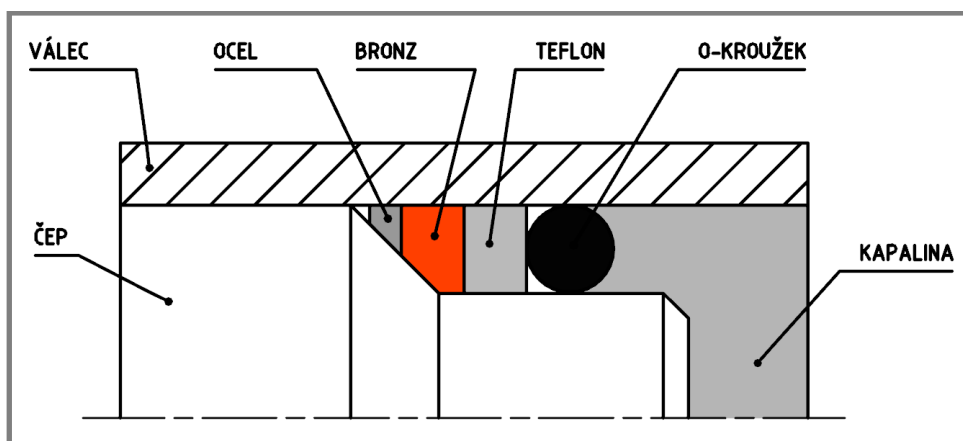
Existují 2 základní typy těsnění. Vzácně je používána i jejich kombinace:

- **Kov na kov:** součástky jsou v kontaktu ne zcela rovnoběžnými plochami
 - vysoký maximální tlak určený materiálem a předepnutím kontaktu
 - při častém rozebírání spoje riziko únavového lomu
- **Jemné těsnění:** kombinace pryže, teflonu, měkkých a tvrdých kovů, atd.
 - množství konstrukčních variant a materiálových kombinací
 - statické i dynamické těsnění
 - možnost snadného testování různých těsnění

Z důvodu častého rozebírání zařízení je vybráno jemné těsnění tvořené kombinací o-kroužku, teflonového kroužku a kroužku z beriliového bronzu (tvrdost 250 HV). V případě problémů bude zařazen 4. kroužek z kalené oceli (vybraná varianta viz obr. 3-5).



Obr. 3-4 Základní typy těsnění [6]



Obr. 3-5 Způsob těsnění čepů, ocelový kroužek nemusí být použit

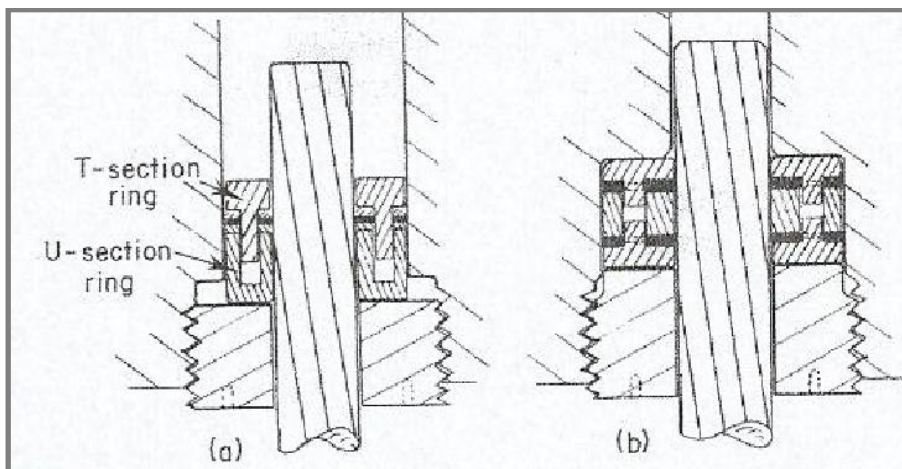
b) Těsnění mezi pístem a válcem

- důležité pro těsnění pístu zesilovače
- pomalý pohyb, potřeba minimalizace tření

Pro těsnění pohyblivých součástí lze využít dva základní způsoby uspořádání:

- **Pohyblivé těsnění:** lze použít jakýkoliv typ z výše uvedených jemných těsnění, ke tření dochází mezi těsněním a válcem
 - vysoká úroveň tření, opotřebovávání vysokotlakého válce
 - jednoduchá konstrukce, nízké náklady na těsnicí součásti
 - žádné úpravy vysokotlakého válce
- **Statické těsnění:** ke tření dochází mezi těsněním a pístem
 - nehrozí poškození drahého válce dlouhodobým používáním
 - konstrukčně velmi jednoduchý píst, nižší úroveň tření

- nutnost použití dalšího uzávěru válce
- nutnost minimální stlačitelnosti pístu

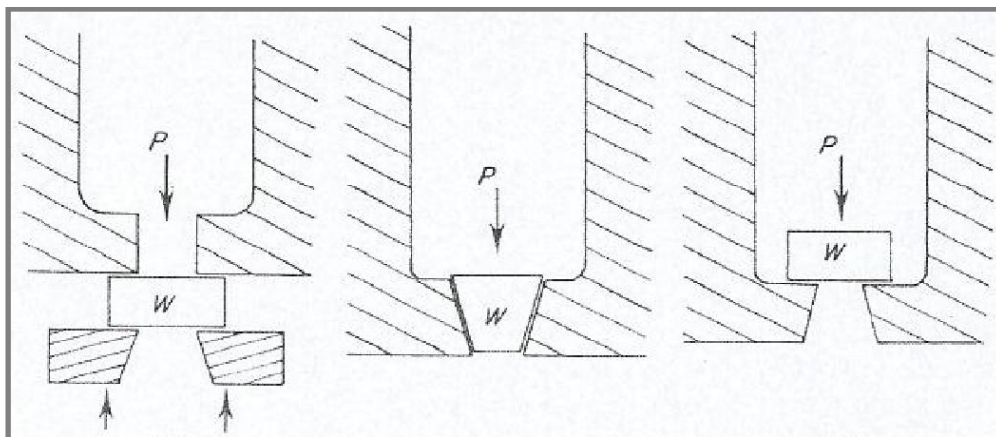


Obr. 3-6 Možnosti statického těsnění, materiály mohou být kombinovány [28]

Pro těsnění pístu byl vybrán zcela identický způsob jako pro těsnění čepů (viz obr. 3-5). Statické těsnění poskytuje nižší tření, ale podstatně zvyšuje plochu, na kterou působí provozní tlak (průměr těsnění 22 mm, působící síla 570 kN). Vysoké tření u pohyblivého těsnění není překážkou, protože vnitřní válec bude vyroben z karbidu wolframu s extrémně vysokou odolností vůči opotřebení.

c) Těsnění safírového skla

Safírová skla byla upřednostněna před diamantovými z důvodu nižší ceny a vyšší kvality krystalické mřížky. Skla jsou použita na radiálních čepích, ve kterých je axiální otvor pro průchod světelného paprsku. Základní možnosti těsnění safírových skel jsou na obr. 3-7.



Obr. 3-7 Základní možnosti těsnění safírových skel [28]

Vzhledem ke konstrukční složitosti a nákladům byl vybrán Poulterův typ těsnění (obr. 3-7 vpravo). Safírové sklo je přilepeno k čepu. Těsnění zajišťuje vyšší tlak působící na jednu stranu skla oproti druhé. U tohoto typu těsnění je velmi důležité zaoblení hrany axiálního otvoru. V ideálním případě může být tímto způsobem těsněn tlak o velikosti až 3 GPa.

d) Těsnění vodičů vstupujících do vnitřního prostoru válce

Do vysokotlakého válce musí být přivedeny vodiče pro měření teploty a napájení elektromagnetu. Literatura poskytuje množství rozebíratelných i nerozebíratelných těsnění. Na základě doporučení japonských odborníků, budou elektrické vodiče těsněny epoxidovou pryskyřicí s titanovým plnivem. Vodiče procházejí závitovým otvorem M1,4, ve kterém jsou pryskyřicí nerozebíratelně utěsněny. Jedná se o nejjednodušší způsob těsnění, který by v případě problémů mohl být snadno nahrazen jiným.

e) Těsnění odvětrávacího otvoru

Pro maximální přesnost měření hustoty kapaliny nesmí být vzduch ve vnitřních prostorách viskozimetru. Zařízení je potřeba odvětrávat v okamžiku, kdy jsou všechny uzávěry válce na svých místech. Řešení bylo nalezeno v literatuře a je založeno na axiálním otvoru v pístu, ve kterém je na konci půlkulové zahloubení. Do něho přesně zapadá kulička připevněná na vlasec procházející axiálním otvorem ven z viskozimetru. Zatažením za vlasec dojde k utěsnění vnitřních prostor. Jiné tvary těsnících součástí nebyly uvažovány, protože by v pístu vyvolávaly velmi vysoké obvodové tahové napětí.

3.6 Měření hustoty kapaliny

3.6

Pro určení viskozity musí být známa hustota kapaliny za aktuálního tlaku a teploty. Na Ústavu konstruování neexistuje zařízení schopné měřit hustotu kapaliny při potřebných podmínkách. Z tohoto důvodu viskozimetr musí umožňovat i měření hustoty kapaliny.

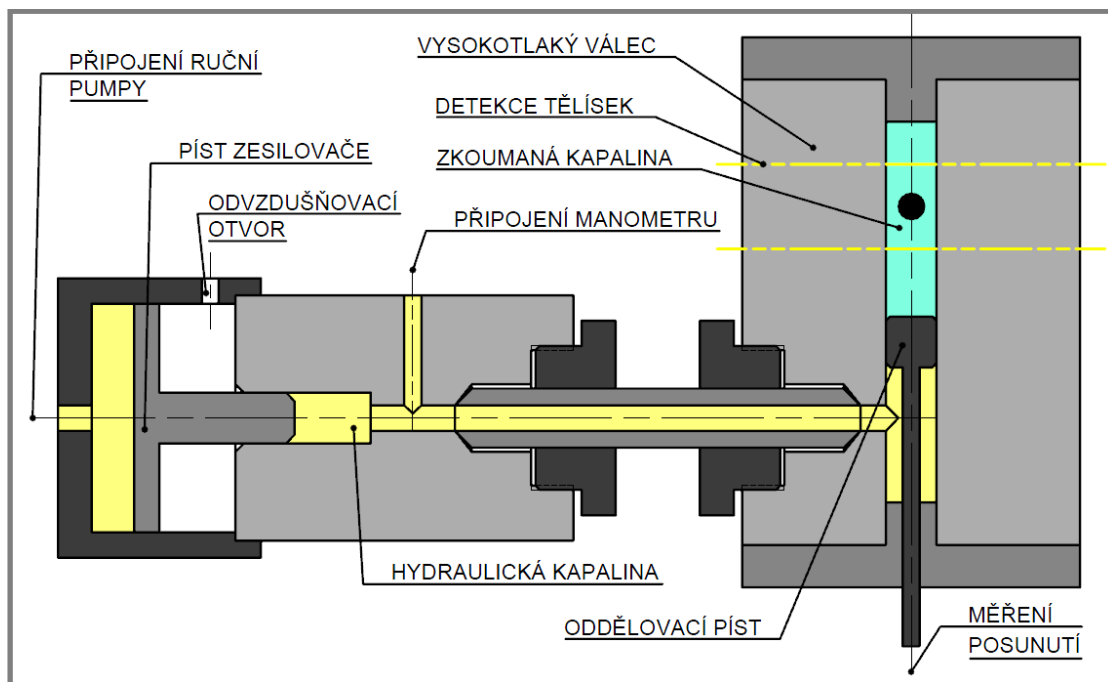
Generování tlaku ve viskozimetru bude probíhat pomocí ruční hydraulické pumpy a zesilovače. Pokud bude znám objem kapaliny a její hustota při atmosférickém tlaku a teplotě 20 °C, bude možné vypočítat aktuální hustotu ze změny objemu kapaliny.

Změna objemu kapaliny (vnitřního objemu viskozimetru) je určena zejména posunutím pístu. Toto posunutí musí být měřeno. Výrazně menší změny objemu vyvolává změna vnitřních rozměrů tlakové nádoby s tlakem a teplotou. Objemové změny tělíska a elektromagnetu jsou vzhledem k ostatním zanedbatelné.

Způsob měření posunutí pístu úzce souvisí s uspořádáním viskozimetru a zesilovače. Níže uvedené 4 varianty vycházejí z literatury a nápadů autora diplomové práce. Výběr konečné varianty proběhl po konzultacích s Japonci.

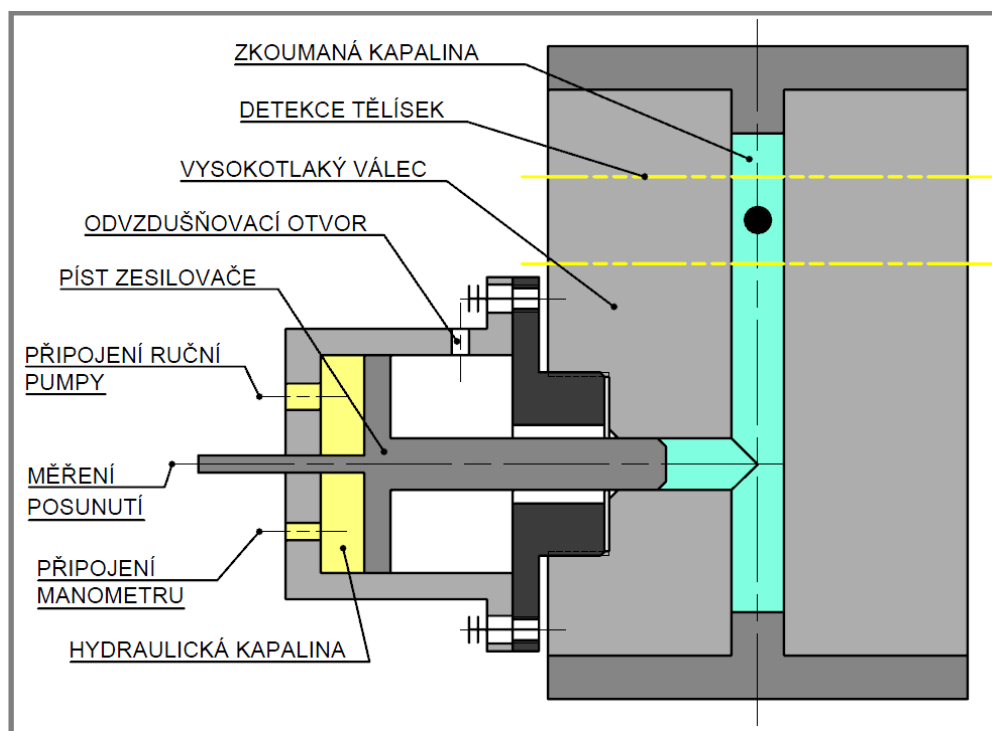
- **Kolmé uspořádání s oddělovacím pístem**

- změna hustoty kapaliny je dána posunutím oddělovacího pístu
- těsnění dvou pohyblivých pístů způsobuje podstatné tlakové ztráty
- více těsnění znamená větší riziko jejich poškození
- případné smíchání hydraulické a zkoumané kapaliny nelze snadno odhalit
- konstrukce viskozimetru je složitější a nákladnější
- pro měření je potřeba menšího množství kapaliny
- výměna zkoumané kapaliny je relativně jednoduchá, problém nastane při porušení oddělovacího pístu



Obr. 3-8 Varianta 1: Kolmé uspořádání s oddělovacím pístem

- **Kolmé uspořádání bez oddělovacího pístu**

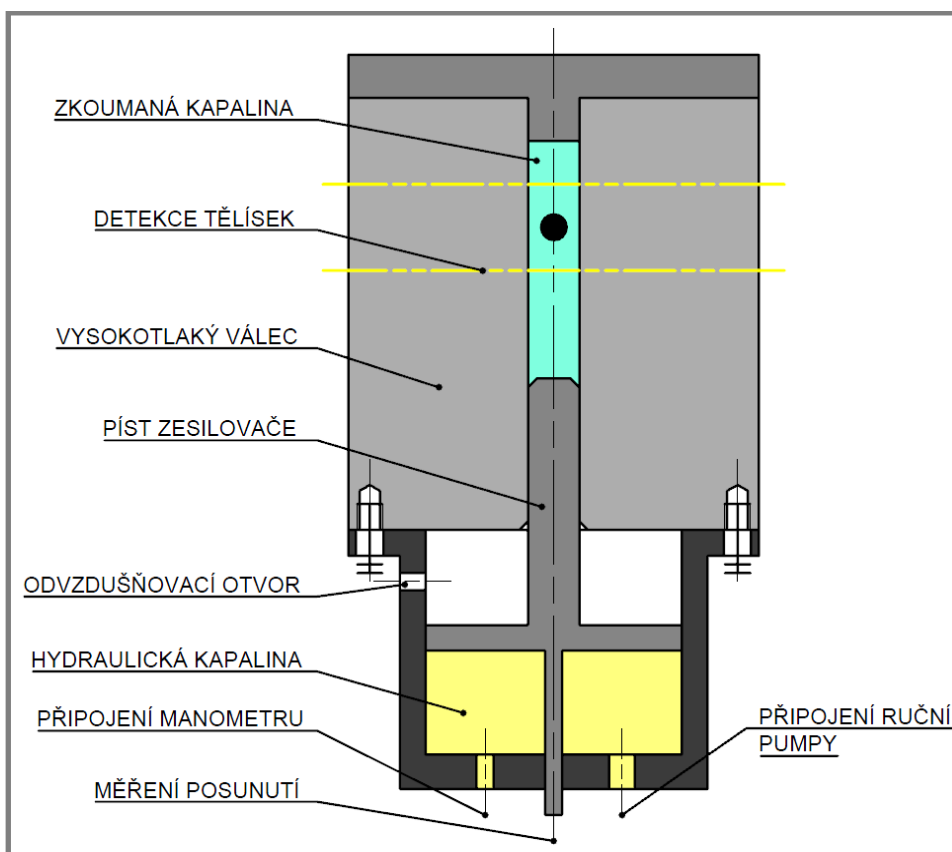


Obr. 3-9 Varianta 2: Kolmé uspořádání bez oddělovacího pístu

- změna hustoty kapaliny je dána posunutím pístu zesilovače
- nezpozorovatelné smíchání hydraulické a provozní kapaliny nemůže nastat
- konstrukce viskozimetru je jednodušší a levnější oproti předchozí variantě
- je potřeba velkého množství zkoumané kapaliny a její výměna je obtížná

- **Koaxiální uspořádání těsné**

- změna hustoty kapaliny je dána posunutím pístu zesilovače
- nezpozorovatelné smíchání hydraulické a provozní kapaliny nemůže nastat
- konstrukce viskozimetru je nejjednodušší a nejlevnější
- zařízení je vyšší, hydraulická kapalina je přiváděna ve směru vertikální osy
- pro měření je potřeba středně velkého množství kapaliny
- výměna zkoumané kapaliny je středně složitá
- vysoký tlak neprochází v radiálním směru celým válcem



Obr. 3-10 Varianta 3: Koaxiální uspořádání těsné

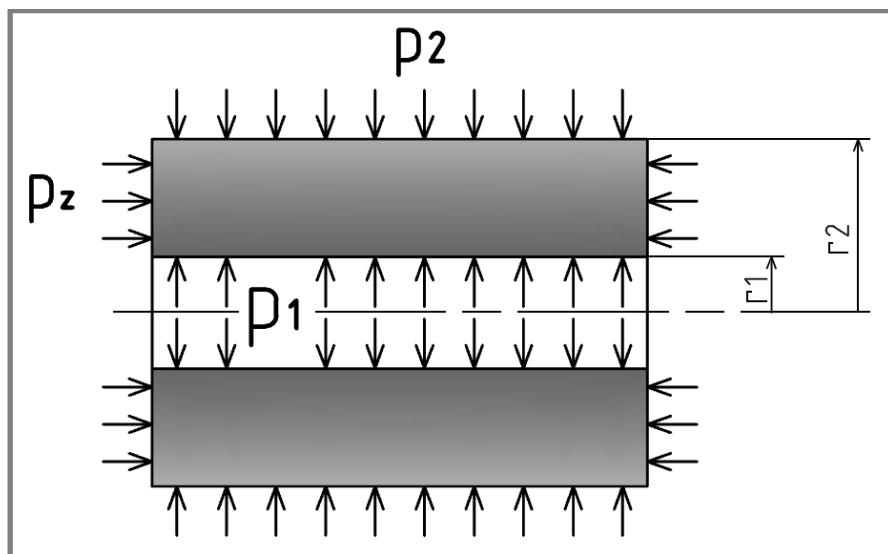
- **Koaxiální uspořádání rozšířené**

Jedná se o kombinaci první a třetí varianty. Zesilovač je spojen s viskozimetrem trubicí a není použit vysokotlaký píst. Oproti předchozím variantám se žádný píst nepohybuje přímo v drahém vysokotlakém válci. Po rozhodnutí vytvořit válec z karbidu wolframu, se tato výhoda stala bezpředmětnou.

Varianta č. 3 byla vybrána jako optimální. Její hlavní výhodou je jednoduchost, nízké náklady, nepřítomnost průchozích radiálních otvorů s kapalinou a úplná originalita řešení. Výhody převážily nad hlavními nevýhodami, kterými je měření tlaku a přívod hydraulické kapaliny v ose viskozimetru, větší celková výška zařízení a větší množství zkoumané kapaliny (oproti první variantě).

4 OPTIMÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole je mnohokrát počítáno napětí a posunutí na válcovém tělese. Níže jsou uvedeny důležité výpočetní vztahy, které jsou následně používány.



Obr. 4-1 Zatížené obecné válcové těleso

Radiální napětí:

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - (p_1 - p_2) \cdot \frac{(r_1^2 r_2^2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

Obvodové napětí:

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + (p_1 - p_2) \cdot \frac{(r_1^2 r_2^2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

Axiální napětí:

$$\sigma_z = -p_z$$

Radiální posuv:

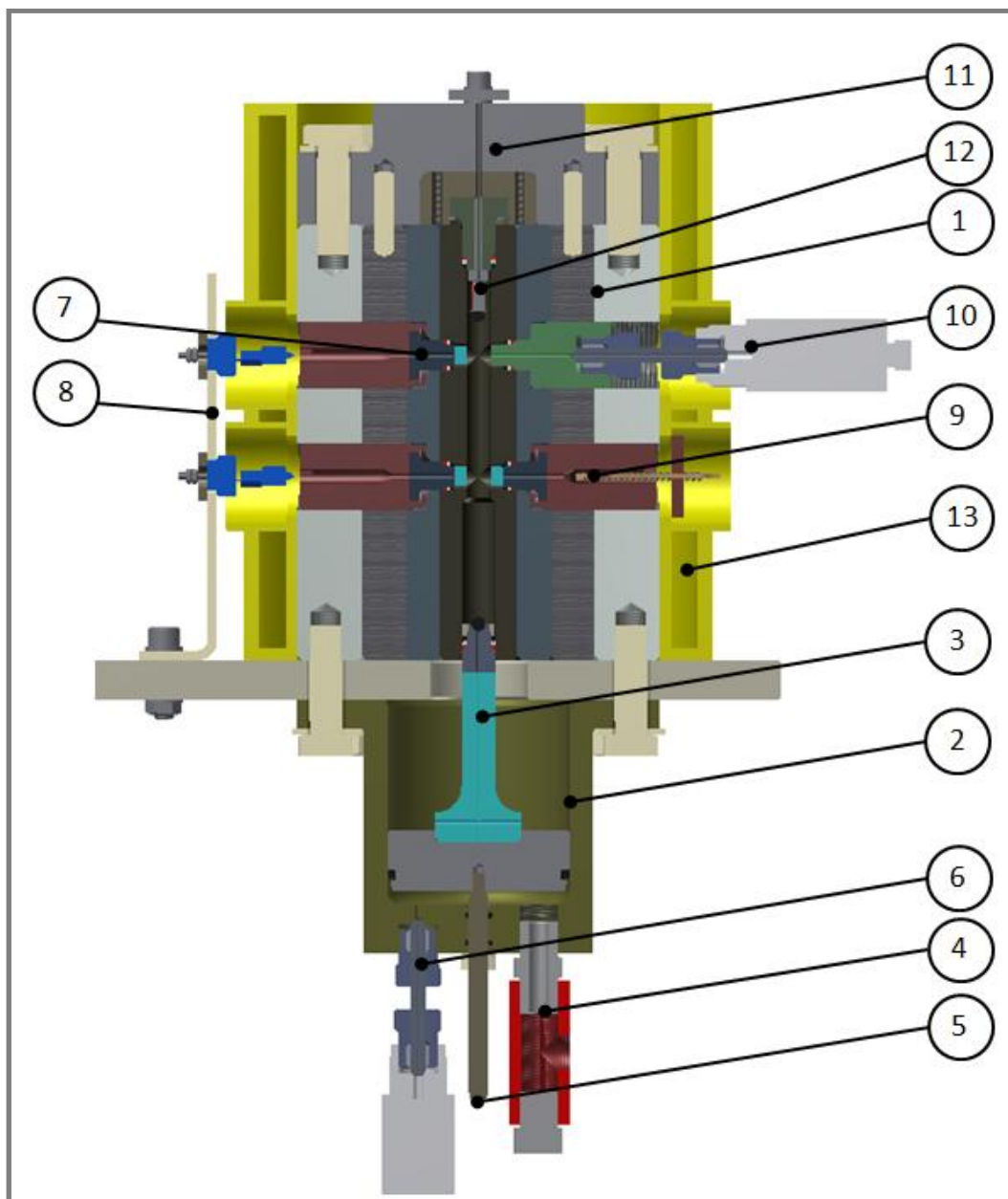
$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r + \frac{1 + \mu}{E} \cdot (p_1 - p_2) \cdot \frac{(r_1^2 r_2^2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r} + \frac{\mu}{E} \cdot p_z$$

Axiální posuv:

$$w = \frac{z}{E} \cdot \left(-p_z \cdot 2\mu \cdot \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right),$$

kde

μ	-	je Poissonova konstanta,
E	MPa	Youngův modul,
r	m	obecná radiální vzdálenost,
z	m	obecná axiální vzdálenost.



Obr. 4-2 Optimální konstrukční řešení vysokotlakého viskozimetru

- 1 Vysokotlaký válec
- 2 Zesilovač tlaku
- 3 Píst zesilovače
- 4 Připojení vysokotlaké ruční pumpy
- 5 Píst pro měření změny objemu kapaliny
- 6 Připojení tlakového čidla do zesilovače
- 7 Pozorovací okno
- 8 Osvětlení (optická detekce tělísek)
- 9 Fotodioda (optická detekce tělísek)
- 10 Připojení tlakového čidla do vysokotlakého válce
- 11 Víko
- 12 Elektromagnet

4.1 Propadávající tělíska a základní rozměry viskozimetru

Základním propadávajícím tělískem je kulička. Aby měření nebylo ovlivňováno radiálními otvory ve válci, musí být mezi kuličkou a stěnou válce dostatečná mezera. Japonský viskozimetr má vnitřní průměr 12 mm a využívá kuliček o průměru 8 mm. S ohledem na potřebné množství kapaliny je vnitřní průměr viskozimetru stanoven na 10 mm. Průměr propadávajících kuliček může být 5 až 8 mm.

Na obr. 1-3 jsou znázorněny základní síly působící na kuličku propadávající kapalinou. Ze silové rovnováhy lze na základě druhého newtonova zákona sestavit pohybovou rovnici:

$$F_g - F_o - F_{vz} = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2},$$

kde F_g je gravitační síla, F_o je odporová (Stokesova) síla, F_{vz} je vztlaková síla, m je hmotnost kuličky, a je zrychlení kuličky, v je rychlost kuličky a s je poloha kuličky. Výsledná diferenciální rovnice popisuje pohyb kuličky v trubce o nekonečně velkém vnitřním průměru. Rovnici lze zpřesnit zavedením korekcí (viz [4]), které využívají Taylorova rozvoje. Jejich zavedením se rovnice stává neřešitelnou. Měřitelný rozsah vysokotlakového kuličkového viskozimetru nemůže být jednoduše vypočítán. Podle literatury je od 10^{-4} do 10^4 Pa · s (viz obr. 1-4).

Při jediném pádu kuličky lze získat dva údaje o její rychlosti na základě doby přerušení prvního a druhého paprsku. Třetí údaj je měřen od okamžiku odkrytí prvního paprsku do okamžiku přerušení druhého paprsku.

Pokud je propadávajícím tělískem válec, odporová síla v pohybové rovnici je nahrazena smykovou silou F_τ (v případě válce s axiálním otvorem má smyková síla 2 složky, 1. – proudění axiálním otvorem, 2. – proudění mezi tělískem a trubkou):

$$F_g - F_{\tau 1} - F_{\tau 2} - F_{vz} = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2}$$

Smyková síla je určena vnitřním třením v kapalině. Z důvodu přítomnosti radiálních otvorů ve válci, lze získat z pádu válcového tělíska pouze jeden údaj o rychlosti. Způsob stanovení rychlosti tělíska je patrný na obr. 4-3.

V následujících rovnicích jsou používány (mimo jiné) tyto veličiny: R_1 – poloměr axiálního otvoru ve válcovém tělisku, R_2 – poloměr válcového tělíska, R_3 – poloměr trubky viskozimetru, ρ_1 – hustota tělíska, ρ_2 – hustota kapaliny, L_t – délka tělíska, $\delta p / \delta z$ – gradient tlaku podél vertikální osy tělíska.

Gravitační síla:

$$F_g = \pi(R_2^2 - R_1^2)L_t\rho_1g$$

Smyková síla ve vnitřním otvoru tělíska [16]:

$$F_{\tau 1} = -\pi L_t R_1^2 \left(\rho_2 g - \frac{\delta p}{\delta z} \right)$$

Smyková síla mezi tělískem a válcem [16]:

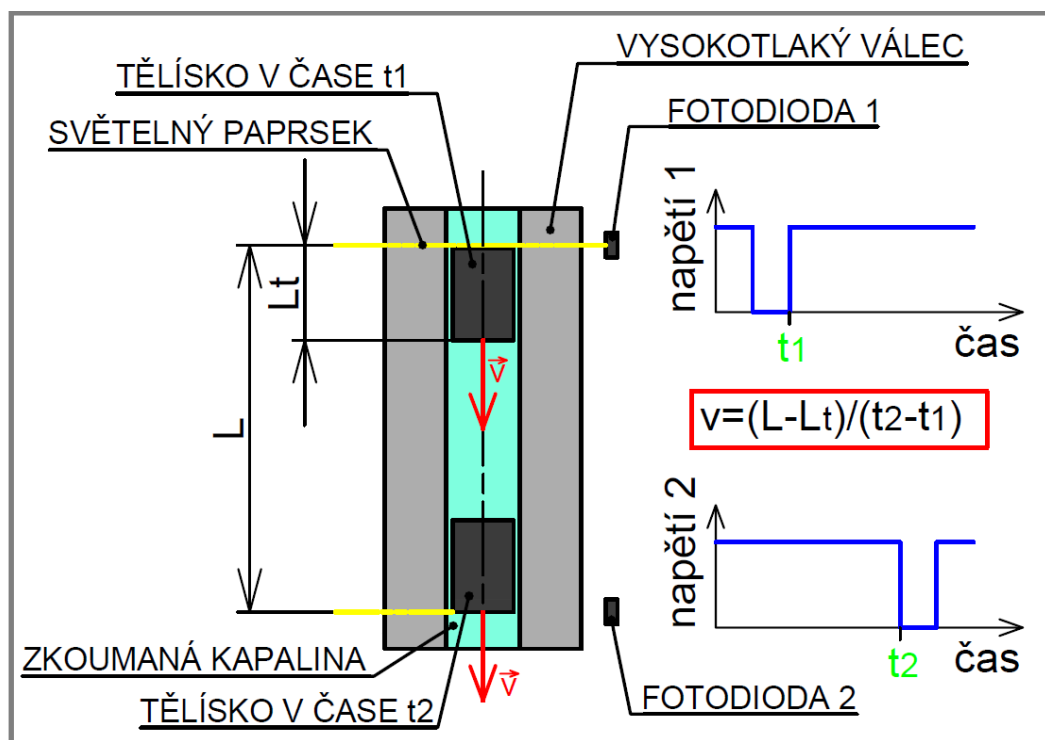
$$F_{\tau 2} = \pi L_t R_2^2 \left(\rho_2 g - \frac{\delta p}{\delta z} \right) + 2\pi L_t \left[v\eta - \frac{\frac{(R_3^2 - R_2^2) \left(\rho_2 g - \frac{\delta p}{\delta z} \right)}{4}}{\ln \left(\frac{R_3}{R_2} \right)} \right]$$

Z Navier-Stokesovy rovnice vyplývá [16]:

$$\left[(R_1^4 - R_2^4 + R_3^4) - \frac{(R_3^2 - R_2^2)^2}{\ln \left(\frac{R_3}{R_2} \right)} \right] \left(\rho_2 g - \frac{\delta p}{\delta z} \right) + \frac{4\eta v (R_3^2 - R_2^2)}{\ln \left(\frac{R_3}{R_2} \right)} = 0$$

Úpravou a zavedením substitute K se rovnice upraví na:

$$\rho_2 g - \frac{\delta p}{\delta z} = \frac{-4\eta v (R_3^2 - R_2^2)}{K}$$



Obr. 4-3 Princip měření rychlosti pro válcové tělísko

Pohybová rovnice propadávajícího válce po implikaci výše uvedených rovnic:

$$(R_2^2 - R_1^2)(\rho_1 - \rho_2)g - \frac{v\eta}{K}M = (R_2^2 - R_1^2)\rho_1 a,$$

kde

$$M = 4(R_3^2 - R_2^2)(R_1^2 - R_2^2) + \frac{2(K + (R_3^2 - R_2^2)^2)}{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}.$$

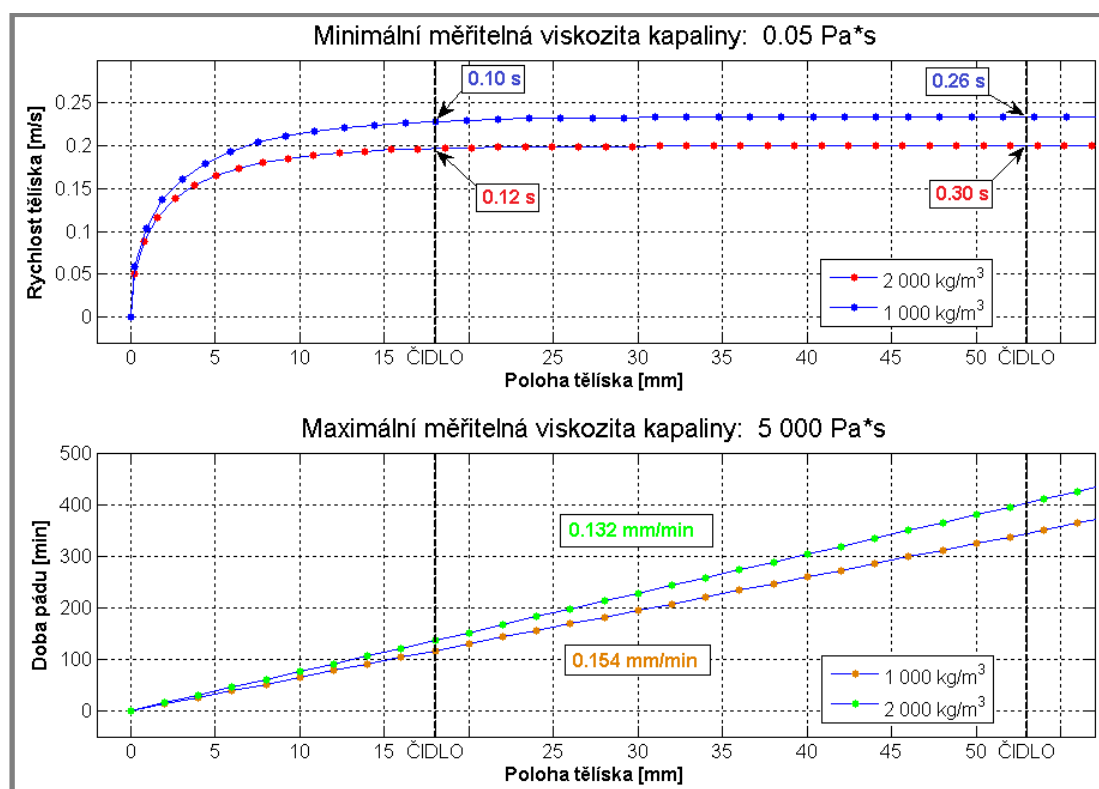
Rovnice popisující pohyb válcového tělíska v trubce s kapalinou:

$$\frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\rho_1} - \frac{M}{K} \cdot \frac{v\eta}{\rho_1(R_2^2 - R_1^2)} = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2}$$

Pohybová rovnice je diferenciální rovnicí druhého řádu. Okrajovou podmínkou je okamžik vypnutí elektromagnetu (v čase 0 s je rychlost nulová). Rovnice byla řešena v programu Matlab pomocí příkazu *dsolve* (viz příloha).

Na obr. 4-4 jsou vykresleny závislosti rychlosti tělíska na jeho poloze pro minimální měřitelnou viskozitu a doby pádu tělíska na jeho poloze pro maximální měřitelnou viskozitu. V každém grafu jsou dvě křivky pro dvě různé hustoty kapaliny.

Při minimální viskozitě byla kontrolována podmínka, že mezi čidly musí být rychlost tělíska konstantní. Při maximální viskozitě se kontrolovala doba měření.



Obr. 4-4 Grafické znázornění pohybových rovnic válcového propadávajícího tělíska

Délka ocelového válcového tělíska byla stanovena na 15 mm. Ve výchozí poloze se spodní okraj tělíska nachází 3 mm nad první optickou závorou. Vzdálenost optických závor od sebe byla na základě výpočtů stanovena na 50 mm. Poměr průměru trubky a navrženého tělíska je 0,93. Axiální otvor v tělísku má průměr 4 mm.

Vnitřní průměr tlakové nádoby nelze dopředu přesně stanovit (vlivem lisování se změnění a následné přebroušení by bylo zbytečně nákladné). Výroba navrženého tělíska nebyla z časových důvodů plánována v rámci diplomové práce. Ověřovací měření mají být provedena pouze s kuličkou.

4.2 Vysokotlaká nádoba

4.2

Vysokotlaká nádoba je nejdůležitější součástí viskozimetru. Před vytvořením jejího konečného návrhu musela být zpracována koncepce celého zařízení. V předchozích kapitolách bylo určeno, že nádoba bude vyrobena technologií lisování souosých kovových válců. K čelům nádoby musí být přišroubováno víko a zesilovač. V nádobě jsou 4 radiální otvory pro realizaci optických závor. Jejich vzdálenost od sebe je 50 mm. Průměr vnitřního otvoru ve válci je 10 mm a na krajích 14 mm (z důvodu těsnění a menší celkové délky). Délka vysokotlakého válce je 180 mm.

4.2.1 Výběr materiálů vysokotlakého válce

4.2.1

Na materiál vysokotlaké nádoby jsou kladeny vysoké požadavky. Mezi nejdůležitější patří mez pevnosti v tahu a tlaku, korozní odolnost a teplotní délková roztažnost. Vysokotlaký válec je tvořen několika do sebe nalisovanými válci. Zvolenou kombinací materiálů byla umožněna aplikace požadovaného maximálního tlaku.

Vhodným, ale drahým materiálem pro výrobu vnitřního válce je karbid wolframu. Tato možnost byla konzultována s technologem lucemburské firmy Ceratizit. Ve spolupráci s ním byl vybrán karbid, ve kterém jsou jednotlivá tvrdokovová zrna spojena niklem. Niklové pojivo (oproti běžnějšímu kobaltu) poskytuje vysokou odolnost proti kyselým i zásaditým látkám. Materiálový list zvoleného karbidu je uveden v příloze. Mez pevnosti v tahu je 2 500 MPa, v tlaku 4 900 MPa, Poissonova konstanta 0,25 a Youngův modul 580 GPa.

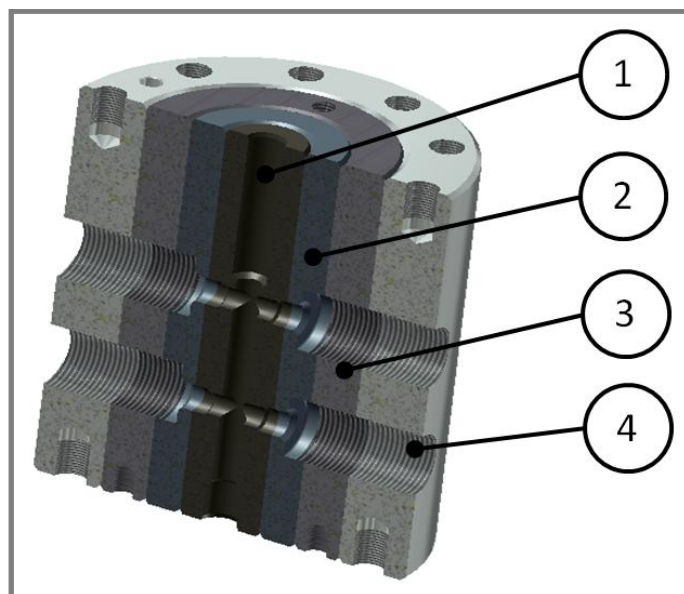
Vnější válce vysokotlaké nádoby jsou tvořeny z oceli. Z více možností byla vybrána nástrojová ocel 19 573 podle ČSN. Tato chrom-molybden-vanadová ocel je určena pro řezné nástroje a výrobu forem pro tváření plastových hmot. Materiál byl vybrán po konzultacích s dodavatelem materiálu (JKZ Bučovice a.s.) a výrobcem částí tlakové nádoby (Soma spol. s r.o. Lanškroun). Jeho výhodou je nízký koeficient teplotní délkové roztažnosti, korozní odolnost a vysoká pevnost v tahu a tlaku.

Zvolená ocel má velmi vysokou teplotu popouštění (560 °C). Ocel může být zušlechťena na tvrdost až 62 HRC a vyznačuje se dobrou prokalitelností. Pevnost oceli v tlaku je 3 100 MPa. Zvolené tvrdosti materiálu 58 HRC odpovídá mez pevnosti v tahu přibližně 2 200 MPa.

4.2.2 Technologie výroby vysokotlakého válce

4.2.2

Vysokotlaká nádoba bude tvořena jedním válcem z karbidu wolframu (tvrdost 93 HRA) a třemi vnějšími válci z nástrojové oceli (58 HRC). Obrábění válce je komplikované (viz obr. 4-5). Délka válce je 180 mm a vnější průměr 150 mm.



Obr. 4-5 Vysokotlaký válec

Axiální otvor ve válci 1 byl vytvořen přímo při výrobě polotovaru. Radiální otvory byly vyrobeny metodou elektroerozivního obrábění až po nalisování. Předvrtané otvory by snížily náklady, ale v průběhu lisování (v jakémkoli pořadí válců) by způsobily destrukci válce (přibližné výpočty viz skript v příloze). Závitové otvory v čelech válce byly vyrobeny ještě před vakuovým kalením jednotlivých válců pro snížení nákladů. Otvory pro kolíky musely být vytvořeny elektroerozivní metodou až po nalisování kvůli zajištění přesnosti montáže.

Vzhledem k ceně vysokotlaké nádoby byly provedeny zkoušky mechanických vlastností dané oceli. Materiál na všechny 3 válce byl zakoupen z jediné tavby. Pro zaručení chemického složení byl požadován materiálový certifikát. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku, zkoušku rázem v ohybu a pro zkoušku tříbodovým ohybem byly vyrobeny ze stejného materiálu a prošly spolu s válci identickým tepelným zpracováním. Pro ověření kvality tepelního zpracování byly výrobcem provedeny zkoušky tvrdosti. Veškeré výsledky zkoušek mechanických vlastností včetně jejich zhodnocení jsou uvedeny v přílohách. Ve výpočtech je používána zejména mez pevnosti v tahu 1 610 MPa a Youngův modul 195 GPa.

Válce byly lisovány v pořadí 4-3-2-1. Při opačném lisování by došlo k prasknutí válce č. 2 po nalisování na válec z karbidu. Při lisování byl pokaždé vnější válec (sestava válců) zahřán na předepsanou teplotu a vnitřní válec byl podchlazen v tekutém dusíku. Po vyrovnání teplot byl přebroušen vnitřní průměr sestavy válců a proces se opakoval (za většího rozdílu teplot).

Vzhledem k ceně válce z karbidu nebyla nalezena česká firma ochotná celou sestavu vyrobit. Výroba byla proto zadána stejné firmě, která vyráběla součásti z karbidu, která má s podobnou výrobou zkušenosti. Pro snížení nákladů na ocelové válce (v Lucembursku 4 500 Euro) byly tyto válce za přibližně 3x nižší cenu vyrobeny firmou Soma. V Lucembursku byl pouze zalisován vnitřní válec. Přesný postup výroby, včetně požadovaných přesahů a minimálních teplotních rozdílů, je popsán na

příslušných výkresech sestavení v přílohách. Následné elektroerozivní obrábění zajišťovala opět firma Soma (u externího dodavatele).

4.2.3 Koncentrátory napětí

4.2.3

V navrženém vysokotlakém válci (viz obr. 4-5) se nacházejí 2 hlavní koncentrátory napětí.

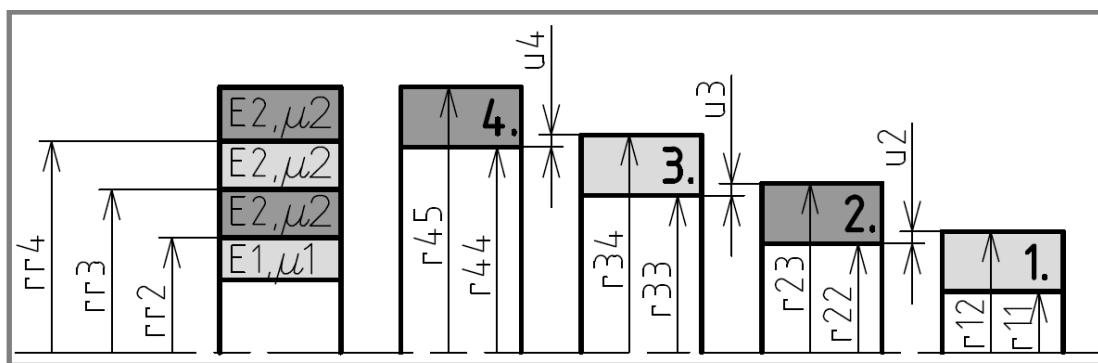
- **Radiální otvor:** Radiální otvor ve válcové nádobě způsobuje koncentraci obvodového a axiálního napětí. Velikost součinitele koncentrace není větší než 2,5.
- **Změna vnitřního průměru:** Ve vysokotlakém válci dochází na dvou místech ke změně vnitřního průměru ze 14 mm na 10 mm. Literatura popisuje koncentraci napětí vlivem změny průměru jako minimální (při porovnání s radiálním otvorem).

Pro ověření těchto informací byla provedena přibližná analýza v programu Autodesk Simulation Multiphysics 2013. Výsledky MKP analýzy potvrdily předpoklad získaný studiem literatury. Ve výpočtech bezpečnosti je používán součinitel koncentrace obvodového a axiálního napětí o velikosti 2,5. V dále uvedených výpočtech se počítá s vnitřním průměrem tlakové nádoby 10 mm, protože radiální otvory jsou v této části.

4.2.4 Výpočet bezpečnosti vůči překročení meze pevnosti

4.2.4

Výpočty byly prováděny iteračním způsobem v programu Matlab (používaný skript viz příloha). V této podkapitole jsou demonstrovány pouze výsledky s ohledem na stanovení maximálního tlaku a bezpečnosti. Pro výpočty byly použity vztahy obecné pružnosti pro válcové těleso a předpoklad, že nalisované válce ze stejného materiálu se chovají jako monolitický válec stejných rozměrů.



Obr. 4-6 Zobrazení rozměrů válce pro výpočty bezpečnosti

Vnější poloměr válce (r_{45}) byl na základě výpočtů stanoven na 75 mm. Poloměry r_{r4} , r_{r3} a r_{r2} byly stanoveny na 48 mm, 30 mm a 16 mm. Rozměry válců před lisováním lze odečíst na výrobním výkresu (přílohy č. v. X1-01B).

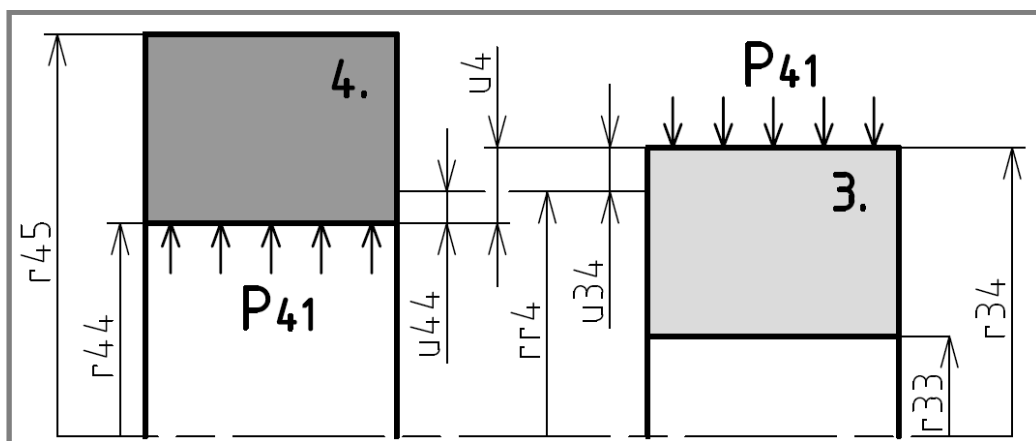
Výpočet bezpečnosti válce je komplikovaný. Zde je uveden výpočet bezpečnosti při nulovém a maximálním zatížení. Nejprve jsou spočítány kontaktní tlaky na

jednotlivých rozhraních válců v průběhu lisování. Následně je na vnitřní povrch válce přidán maximální tlak a jsou spočítány přírůstky ke kontaktnímu tlaku na jednotlivých rozhraních.

Lisování válců 4 a 3

Tlak působící na rozhraní válců 4 - 3 po nalisování s přesahem $u_4 = 0,0535$ mm:

Po nalisování válců s požadovaným přesahem bude na jejich povrchy (na poloměru r_{r4}) působit stejně velký kontaktní tlak P_{41} . Součet posunutí povrchů obou válců způsobených tímto tlakem ($u_{44} + u_{34}$) se musí rovnat požadovanému přesahu (viz obr. 4-7).



Obr. 4-7 Kontaktní tlaky při lisování válců

$$u_{44} + (-u_{34}) = u_4,$$

kde

$$u_{44} = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{P_{41} r_{44}^2 - 0}{r_{45}^2 - r_{44}^2} \cdot r_{44} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot (P_{41} - 0) \cdot \frac{r_{44}^2 r_{45}^2}{r_{45}^2 - r_{44}^2} \cdot \frac{1}{r_{44}},$$

$$u_{34} = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{0 - P_{41} r_{34}^2}{r_{34}^2 - r_{33}^2} \cdot r_{34} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot (0 - P_{41}) \cdot \frac{r_{33}^2 r_{34}^2}{r_{34}^2 - r_{33}^2} \cdot \frac{1}{r_{34}}$$

Po zjednodušení a dosazení jednotlivých posuvů do rovnice uvedené výše:

$$\frac{P_{41}}{E_2} \cdot \frac{r_{44}}{r_{45}^2 - r_{44}^2} \cdot [(1 - \mu_2) r_{44}^2 + (1 + \mu_2) r_{45}^2] + \left(-\frac{P_{41}}{E_2} \cdot \frac{r_{34}}{r_{34}^2 - r_{33}^2} \cdot [(1 - \mu_2) r_{34}^2 + (1 + \mu_2) r_{33}^2] \right) = u_4$$

V rovnici je jedinou neznámou kontaktní tlak P_{41} . Vzhledem k velikosti rovnice není uvedeno číselné dosazení.

$$P_{41} = \frac{u_4 E_2}{\frac{r_{44} [(1 - \mu_2) r_{44}^2 + (1 + \mu_2) r_{45}^2]}{r_{45}^2 - r_{44}^2} + \frac{r_{34} [(1 - \mu_2) r_{34}^2 + (1 + \mu_2) r_{33}^2]}{r_{34}^2 - r_{33}^2}} = 47 \text{ MPa}$$

Požadovaný přesah $u_4 = 0,0535$ mm mezi válci č. 4 a 3 vyvolá na rozhraní rr_4 kontaktní tlak o velikosti 47 MPa.

Lisování válců 4, 3 a 2

Tlak působící na rozhraní válců 3 - 2 po nalisování s přesahem $u_3 = 0,0825$ mm:

Při výpočtu lisování válce 2 do již složených válců 3 a 4 jsou vnější válce považovány za jediný válec s poloměry r_{33} a r_{45} .

$$u_{33} + (-u_{23}) = u_3 ,$$

$$P_{31} = \frac{u_4 E_2}{\frac{r_{33}[(1-\mu_2)r_{33}^2 + (1+\mu_2)r_{45}^2]}{r_{45}^2 - r_{33}^2} + \frac{r_{23}[(1-\mu_2)r_{23}^2 + (1+\mu_2)r_{22}^2]}{r_{23}^2 - r_{22}^2}} = 169 \text{ MPa}$$

Požadovaný přesah $u_3 = 0,0825$ mm mezi válci č. 2 a 3 vyvolá na rozhraní rr_3 kontaktní tlak o velikosti 169 MPa. Vlivem nalisování druhého válce se posune rozhraní rr_4 a bude na něm působit větší kontaktní tlak.

Posunutí rozhraní rr_4 způsobené nalisováním druhého válce:

$$u_{1rr4} = \frac{1-\mu_2}{E_2} \cdot \frac{P_{31} r r_3^2}{r_{45}^2 - r r_3^2} \cdot r r_4 + \frac{1+\mu_2}{E_2} \cdot P_{31} \cdot \frac{r r_3^2 r_{45}^2}{r_{45}^2 - r r_3^2} \cdot \frac{1}{r r_4} = 0,0307 \text{ mm}$$

Vypočítaný posun rozhraní rr_4 musí odpovídat posunutí vnitřního průměru vnějšího válce. Při známém posunutí lze vypočítat tlak, který jej způsobil. Tento tlak ve skutečnosti působí navíc na daném rozhraní.

Dodatečný tlak na rozhraní rr_4 způsobený nalisováním druhého válce:

$$P_{42} = \frac{u_{1rr4} E_2 (r_{45}^2 - r r_4^2)}{[(1-\mu_2) r r_4^2 + (1+\mu_2) r_{45}^2] r r_4} = 46 \text{ MPa}$$

Po nalisování druhého válce bude na rozhraní rr_4 kontaktní tlak větší o 46 MPa.

Lisování válců 4, 3, 2 a 1

Tlak působící na rozhraní válců 2 - 1 po nalisování s přesahem $u_2 = 0,0757$ mm:

Při výpočtu lisování válce 1 do již složených válců 2, 3 a 4 jsou vnější válce považovány za jediný válec s poloměry rr_2 a r_{45} .

$$u_{22} + (-u_{12}) = u_2 ,$$

$$P_{21} = \frac{u_2}{\frac{r_{22}[(1-\mu_2)r_{22}^2 + (1+\mu_2)r_{45}^2]}{E_2(r_{45}^2 - r_{22}^2)} + \frac{r_{12}[(1-\mu_1)r_{12}^2 + (1+\mu_1)r_{11}^2]}{E_1(r_{12}^2 - r_{11}^2)}} = 536 \text{ MPa}$$

Nalisování válce z karbidu ovlivní kontaktní tlaky na rozhraních rr_{33} a rr_{44} . Princip výpočtu je stejný jako při předchozím lisování.

Posunutí rozhraní rr_3 způsobené nalisováním prvního válce:

$$u_{1rr3} = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{P_{21} rr_2^2}{r_{45}^2 - rr_2^2} \cdot rr_3 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot P_{21} \cdot \frac{rr_2^2 r_{45}^2}{r_{45}^2 - rr_2^2} \cdot \frac{1}{rr_3} = 0,0347 \text{ mm}$$

Posunutí rozhraní rr_4 způsobené nalisováním prvního válce:

$$u_{2rr4} = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{P_{21} rr_2^2}{r_{45}^2 - rr_2^2} \cdot rr_4 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot P_{21} \cdot \frac{rr_2^2 r_{45}^2}{r_{45}^2 - rr_2^2} \cdot \frac{1}{rr_4} = 0,0243 \text{ mm}$$

Dodatečný tlak na rozhraní rr_3 způsobený nalisováním prvního válce:

$$P_{32} = \frac{u_{1rr3} E_2 (r_{45}^2 - rr_3^2)}{[(1 - \mu_2) rr_3^2 + (1 + \mu_2) r_{45}^2] rr_3} = 134 \text{ MPa}$$

Dodatečný tlak na rozhraní rr_4 způsobený nalisováním prvního válce:

$$P_{43} = \frac{u_{2rr4} E_2 (r_{45}^2 - rr_4^2)}{[(1 - \mu_2) rr_4^2 + (1 + \mu_2) r_{45}^2] rr_4} = 37 \text{ MPa}$$

Kontaktní tlaky působící na jednotlivá rozhraní po nalisování:

$$\begin{aligned} P_1 &= 0 \text{ MPa} \\ P_{21} &= 536 \text{ MPa} \\ P_{31} &= P_{31} + P_{32} = 169 \text{ MPa} + 134 \text{ MPa} = 303 \text{ MPa} \\ P_{41} &= P_{41} + P_{42} + P_{43} = 47 \text{ MPa} + 46 \text{ MPa} + 37 \text{ MPa} = 130 \text{ MPa} \\ P_5 &= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

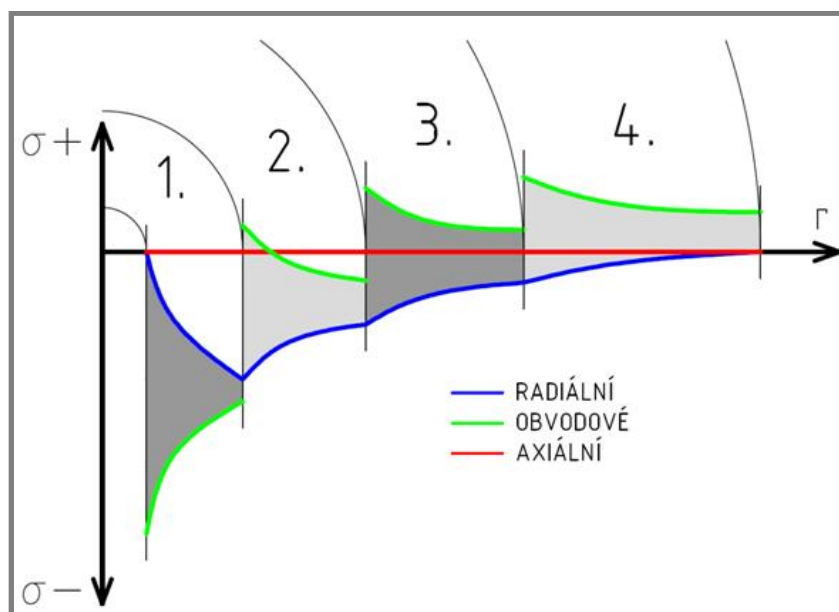
Tab. 4-1 Jednotlivé složky napětí ve válcích po nalisování

Válec č.		1		2		3		4	
Vnější	Vnitřní	r11	r12	r22	r23	r33	r34	r44	r45
Obvodové (MPa)		-1 188	-652	115	-118	265	92	310	180
Radiální (MPa)		0	-536	-536	-303	-303	-130	-130	
Axiální (MPa)		0	0	0	0	0	0	0	0
Redukované (MPa)		1 188	652	651	303	568	222	440	180
Obvodové $\cdot \alpha$ (MPa)		-2 970	-1 630	288	-295	663	230	775	450
Axiální $\cdot \alpha$ (MPa)		0	0	0	0	0	0	0	0
Redukované (MPa)		2 970	1 630	824	303	966	360	905	450
Limitní (MPa)		-4 900	-4 900	1 610	1 610	1 610	1 610	1 610	1 610
Bezpečnost (1)		1,65	3	1,95	5,31	1,67	4,47	1,78	3,58

Na základě vypočítaných kontaktních tlaků lze určit hodnoty jednotlivých složek napětí ve válcích. Jednotlivá napětí byla vypočítána ze vztahů uvedených na začátku kapitoly. Redukovaná napětí jsou vypočtena využitím podmínky $\max \tau$. Válec č. 1 nemá konstantní vnitřní průměr. Nejvýznamější koncentrátor napětí se nachází na povrchu s průměrem 10 mm. Z tohoto důvodu výpočty prováděny rovněž k tomuto

povrchu. Znakem α je označován součinitel koncentrace napětí. Jako limitní napětí je stanovena mez pevnosti v tahu/tlaku a je porovnávána redukováným napětím.

Při navrhování válce byla kontrolována i bezpečnost jednotlivých válců v průběhu lisování. Tyto kontroly ukázaly nutnost lisovat válce od vnějšího povrchu. Rovněž se ukázalo jako nemožné předpřipravit radiální otvory před lisováním. Z hlediska hotového zařízení nejsou tyto výpočty důležité a nejsou zde uváděny. Částečné ověření se nachází v uvedeném skriptu pro Matlab.



Obr. 4-8 Grafické vyjádření jednotlivých složek napětí na válci bez zatížení

Zhodnocení výpočtů lisování:

Vysokotlaký válec se bude většinu času nacházet v nezatíženém stavu. Navzdory tomu může dojít k jeho porušení vlivem tlaků působících na rozhraní jednotlivých válců. Nejmenší bezpečnost válce vzhledem k meznímu stavu pevnosti je na vnitřním povrchu válce z karbidu. Hodnota bezpečnosti je 1,65. Nejnebezpečnějším místem u ocelových válců je vnitřní povrch třetího válce, kde je bezpečnost 1,67.

Zatížení vysokotlakého válce tlakem 1 500 MPa

Tlak aplikovaný na vnitřní povrch válce zvýší kontaktní tlaky na jednotlivých rozhraních. V následujících výpočtech je započítán tlak na vnitřním povrchu válce o velikosti $P_1 = 1\,500$ MPa. Oproti předchozí situaci jsou nyní válce namáhány navíc tahem od zesilovače a víka vysokotlaké nádoby. Tento tah ovlivní skutečné posuvy jednotlivých rozhraní, ale neovlivní obvodové ani radiální složky napětí. Proto je axiální tlak při výpočtech radiálních posuvů jednotlivých rozhraní zanedbáván, aniž by došlo k zanesení nepřesnosti do výpočtů.

Tlak P_{22} působící na rozhraní rr_2 po aplikaci tlaku $P_1 = 1\,500$ MPa:

Posunutí ocelového válce a válce z karbidu rozhraní musí být na daném rozhraní stejně velké. Vnější ocelové válce lze považovat za jediný válec.

$$u_{1rr2} = u_{2rr2},$$

$$u_{1rr2} = \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{P_1 r_{11}^2 - P_{22} r r_2^2}{r r_2^2 - r_{11}^2} r r_2 + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot (P_1 - P_{22}) \cdot \frac{r_{11}^2 r r_2^2}{r r_2^2 - r_{11}^2} \cdot \frac{1}{r r_2},$$

$$u_{2rr2} = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{P_{22} r r_2^2 - 0}{r_{45}^2 - r r_2^2} \cdot r r_2 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot (P_{22} - 0) \cdot \frac{r_{45}^2 r r_2^2}{r_{45}^2 - r r_2^2} \cdot \frac{1}{r r_2},$$

kde

P_{22} MPa je dodatečný tlak působící na druhém rozhraní.

$$P_{22} = \frac{2P_1 r_{11}^2 E_2 (r_{45}^2 - r r_2^2)}{E_2 (r_{45}^2 - r r_2^2) [(1 - \mu_1) r r_2^2 + (1 + \mu_1) r_{11}^2] + E_1 (r r_2^2 - r_{11}^2) [(1 - \mu_2) r r_2^2 + (1 + \mu_2) r_{45}^2]} = 63 \text{ MPa}$$

$$u_{1rr2} = 0,0069 \text{ mm}$$

Dodatečný tlak na druhém a třetím rozhraní se vypočítá zcela stejně jako při lisování prvního válce. Pro zachování přijatelné délky diplomové práce jsou zde uvedeny pouze výsledky výpočtů.

Posunutí rozhraní rr_3 způsobené aplikací tlaku P_1 :

$$u_{2rr3} = 0,0039 \text{ mm}$$

Posunutí rozhraní rr_4 způsobené aplikací tlaku P_1 :

$$u_{3rr4} = 0,0027 \text{ mm}$$

Dodatečný tlak na rozhraní rr_3 způsobený aplikací tlaku P_1 :

$$P_{33} = 15 \text{ MPa}$$

Dodatečný tlak na rozhraní rr_4 způsobený aplikací tlaku P_1 :

$$P_{44} = 4 \text{ MPa}$$

Tlaky působící na jednotlivých rozhraních po aplikaci tlaku P_1 :

$$\begin{aligned} P_1 &= 1500 \text{ MPa} \\ P_2 &= P_{21} + P_{22} = 536 \text{ MPa} + 63 \text{ MPa} = 599 \text{ MPa} \\ P_3 &= P_{31} + P_{33} = 303 \text{ MPa} + 15 \text{ MPa} = 318 \text{ MPa} \\ P_4 &= P_{41} + P_{44} = 130 \text{ MPa} + 4 \text{ MPa} = 134 \text{ MPa} \\ P_5 &= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Axiální napětí:

Ve výpočtu se předpokládá rovnoměrné rozložení axiální síly v celého průřezu vysokotlakého válce. Přesné parametry přenosu sil nelze určit. Vzhledem k velikosti

osové síly a průměru válce je případná nepřesnost výpočtu axiálního napětí zanedbatelná vůči obvodovému a radiálnímu napětí.

$$\sigma_z = \frac{F_1}{\pi(r_{45}^2 - r_{11}^2)} = \frac{231\,000\text{ N}}{\pi(0,075^2 - 0,005^2)\text{mm}^2} = 13\text{ MPa}$$

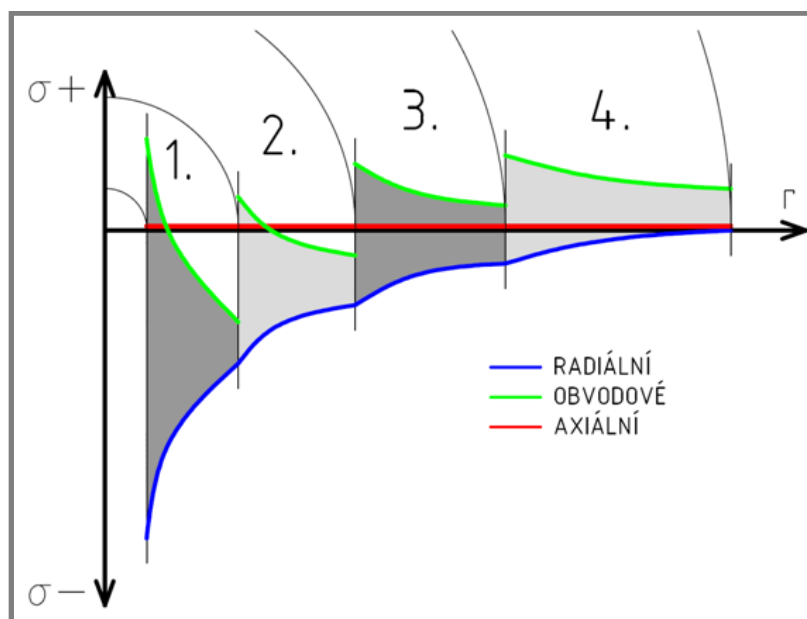
Radiální a obvodové složky na jednotlivých válcích jsou opět uvedeny bez prezentování jednotlivých výpočtů.

Tab. 4-2 Jednotlivé složky napětí ve válcích po zatížení

Válec č.	1		2		3		4	
Vnější Vnitřní	r11	r12	r22	r23	r33	r34	r44	r45
Obvodové (MPa)	497	-404	186	-95	286	102	320	186
Radiální (MPa)	-1 500	-599	-599	-318	-318	-144	-144	0
Axiální (MPa)	13	13	13	13	13	13	13	13
Redukované (MPa)	1 997	612	785	331	604	157	464	186
Obvodové · α (MPa)	1 243	-1 010	465	-238	715	255	800	465
Axiální · α (MPa)	33	33	33	33	33	33	33	33
Redukované (MPa)	2 743	1 043	1 064	331	1 033	399	944	465
Limitní (MPa)	1 250	-4 900	1 610	1 610	1 610	1 610	1 610	1 610
Bezpečnost (1)	1,01	4,7	1,51	4,86	1,56	4,75	1,71	3,46

Zhodnocení výpočtů při zatížení maximálním tlakem:

U ocelových válců (2, 3, 4) došlo k nárůstu redukovaného napětí a nebezpečné místo se přesunulo na vnitřní povrch vnitřního ocelového válce. Bezpečnost vůči překročení meze pevnosti v tomto místě je 1,51. Zde se pozitivně projevila vhodná kombinace materiálů. Pokud by byl vnitřní válec ocelový, celkový průměr válce by musel být podstatně větší.



Obr. 4-9 Grafické vyjádření jednotlivých složek napětí na válci po zatížení

Nejnebezpečnějším místem z hlediska celého válce je vnitřní povrch válce z karbidu. V místě radiálních otvorů dochází k podstatné koncentraci nebezpečného obvodového tahového napětí. Karbid wolframu se při zatížení tahovým napětím nechová stejně jako ocel. Vlivem možné nehomogenity struktury může v samotném materiálu docházet ke koncentraci tahového napětí v místech shluků karbidů a na jejich ostrých hranách. Použitý materiál má mez pevnosti v tahu 2 500 MPa, ale vzhledem ke specifickému chování v tahové oblasti, nesmí tahové napětí v materiálu překročit polovinu této hodnoty z důvodu bezpečnosti.

Bezpečnost na vnitřním povrchu válce z karbidu vůči překročení maximálního povoleného tahového napětí je 1,01. Podrobnější rozbor bezpečnosti je uveden v podkapitole zabývající se teplotními vlivy na chování vysokotlakého válce.

4.2.5 Lisování vysokotlakého válce

Jednotlivé součásti vysokotlakého válce jsou nalisovány s velkým přesahem. Pro jeho zajištění byly vnější válce ohřívány v peci a vnitřní válce chlazeny v tekutém dusíku. Při ohřevu ocelových válců nesměla teplota překročit maximální popouštěcí teplotu oceli 560 °C [31]. Její překročení by způsobilo zhoršení mechanických vlastností získaných zušlechtěním materiálu.

Lisování válců 4-3 (vnějších ocelových válců):

$$\Delta T_4 = \frac{u_4}{\alpha_o \cdot r r_4} = \frac{0,053 \text{ 5 mm}}{9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 48 \text{ mm}} = 124 \text{ K},$$

kde

ΔT_4	K	je minimální rozdíl teplot pro první lisování,
u_4	mm	požadovaný přesah na daném poloměru,
α_o	K ⁻¹	teplotní délková roztažnost oceli,
$r r_4$	mm	poloměr válce na rozhraní mezi 3. a 4. válcem.

Lisování válce 2 (ocel) do vnějších válců (3, 4):

$$\Delta T_3 = \frac{u_3}{\alpha_o \cdot r r_3} = \frac{0,082 \text{ 5 mm}}{9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 30 \text{ mm}} = 306 \text{ K}$$

Lisování válce 1 (karbid) do vnějších ocelových válců (2, 3, 4):

$$u_{2k} = \alpha_k \cdot r r_2 (T_0 - T_N) = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 16 \text{ mm} (293 - 77) \text{ K} = 0,017 \text{ 6 mm},$$

kde

u_{2k}	mm	je změna poloměru válce 1 po vložení do tekutého dusíku,
α_k	K ⁻¹	teplotní délková roztažnost karbidu,
T_0	K	pokojová teplota,
T_N	K	teplota varu dusíku.

$$\Delta T_2 = \frac{u_2 - u_{2k}}{\alpha_o \cdot rr_2} + T_0 = \frac{(0,0757 - 0,0176) \text{ mm}}{9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \cdot 16 \text{ mm}} + 293 \text{ K} = 696 \text{ K} = 423 \text{ }^\circ\text{C},$$

kde

ΔT_2 mm je minimální teplota ocelových válců pro poslední lisování.

Při ohřátí (ochlazení) válců na vypočítané teploty budou jejich průměry na daném rozhraní shodné. Pro bezproblémové nalisování byla výrobcem vyžadována vůle mezi lisovanými válci alespoň 0,015 mm. Pro její dosažení musejí být ocelové válce zahřáty navíc o 102 °C. Při teplotě oceli 525 °C nedojde ke změně mechanických vlastností.

4.2.6 Vliv teploty a přesnosti výroby na maximální tlak ve válci

4.2.6

Maximální tlak ve válci je závislý na velikosti přesahu mezi ocelovým a karbidovým válcem. Tento přesah byl stanoven při 20 °C, ovšem pracovní rozsah viskozimetru je –30 až 120 °C. V důsledku různé teplotní délkové roztažnosti karbidu a oceli se bude skutečný přesah měnit v závislosti na teplotě. Při nižší teplotě roste obvodové tlakové napětí na vnitřním povrchu válce a hrozí jeho zničení. Vyšší teplota toto napětí naopak snižuje.

Prvním závěrem je, že válec může být zahříván na libovolnou teplotu, pokud není zatížen. Při vyšší teplotě klesá maximální povolený tlak ve válci. Naopak ochlazením válce se zvyšuje maximální tlak ve viskozimetru. Nebezpečí vzniká při ochlazování válce před zatížením.

Ochlazování zařízení

Změna přesahu v důsledku ochlazení na –30 °C:

$$\Delta u_- = rr_2(T_0 - T_{\min})(\alpha_o - \alpha_k) = 16 \text{ mm} \cdot (293 - 243) \text{ K} \cdot (9 - 5,1) 10^{-6} \text{ K}^{-1} = 0,0031 \text{ mm},$$

kde

Δu_- mm je změna přesahu v důsledku maximálního ochlazení,
 T_{\min} K minimální teplota ve viskozimetru,
 T_0 K pokojová teplota,
 rr_2 mm poloměr válce na rozhraní mezi 1. a 2. válcem.

Při pokojové teplotě je kontaktní tlak na rozhraní karbid-ocel 536 MPa. Ten se zvětší, protože skutečný přesah se také zvětší.

Přesah válců na rozhraní rr_2 při –30 °C:

$$u_- = u_2 + \Delta u_- = 0,0757 \text{ mm} + 0,0031 \text{ mm} = 0,0788 \text{ mm}$$

Kontaktní tlak na rozhraní rr_2 při –30 °C se spočítá zcela stejně, jak bylo ukázáno v předchozích podkapitolách. Zde uveden pouze výsledek:

Kontaktní tlak působící na prvním rozhraní při $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bez zatížení):

$$P_{21-} = 559\text{ MPa}$$

Tento kontaktní tlak vyvolává na vnitřním povrchu válce tlakové napětí o velikosti $3\,030\text{ MPa}$ (při koncentraci napětí $2,5$). Na základě porovnání napětí s mezí pevnosti karbidu v tlaku ($4\,900\text{ MPa}$) není problém ochlazení válce před natlakováním zařízení.

Ohřívání zařízení

Změna přesahu v důsledku ohřevu na $120\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\begin{aligned}\Delta u_+ &= rr_2(T_{\max} - T_0)(\alpha_o - \alpha_k) = 16\text{ mm}(393 - 293)\text{ K} \cdot (9 - 5,1) \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1} \\ &= 0,006\,2\text{ mm},\end{aligned}$$

kde

Δu_+ mm je změna přesahu v důsledku maximálního ohřátí,
 T_{\max} K maximální teplota ve viskozimetru.

Přesah válců na rozhraní rr_2 při $120\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$u_+ = u_2 - \Delta u_+ = 0,075\,7\text{ mm} - 0,006\,2\text{ mm} = 0,0695\text{ mm}$$

Při pokojové teplotě je kontaktní tlak na rozhraní karbid-ocel 536 MPa . Ten se zmenší, protože skutečný přesah se také zmenší

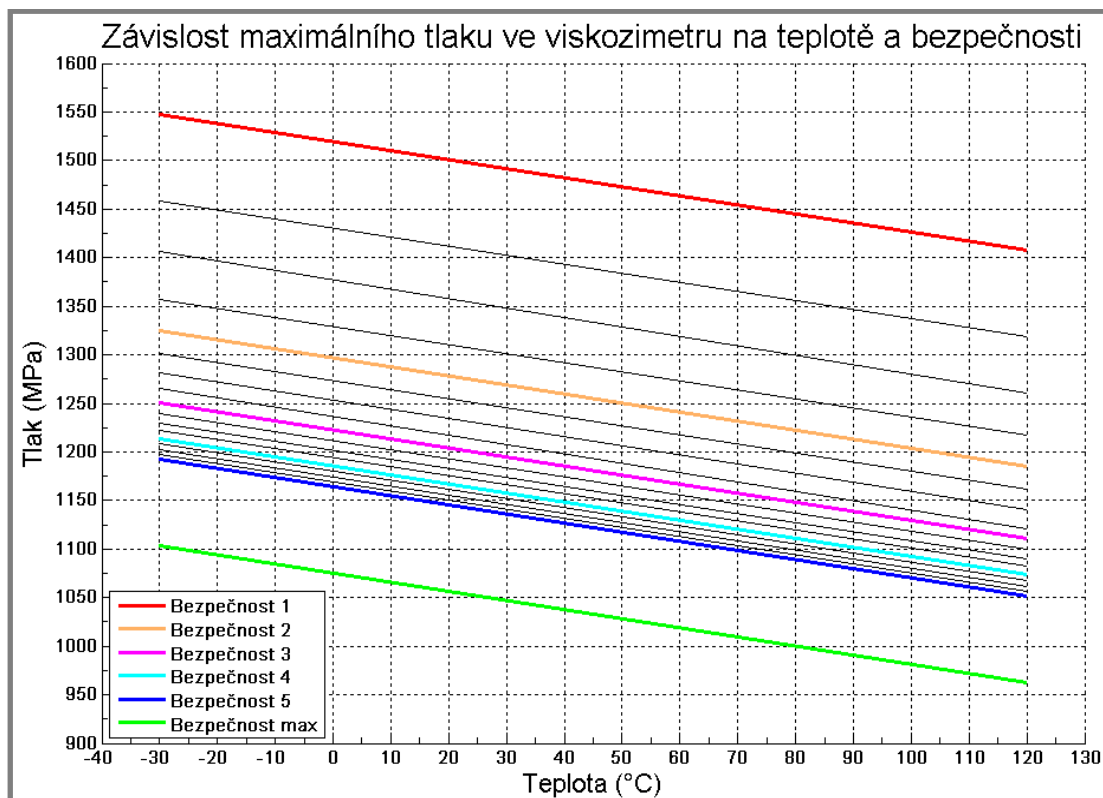
Kontaktní tlak působící na prvním rozhraní při $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bez zatížení):

$$P_{21+} = 488\text{ MPa}.$$

Změna tlaku na rozhraní je podstatná z hlediska obvodového napětí na vnitřním povrchu. Maximální tlak ve viskozimetru v závislosti na teplotě je stanoven na základě porovnávání povoleného tahového napětí a jeho skutečné hodnoty. Způsob výpočtu maximálního tlaku je stejný jako při výpočtu bezpečnosti a není zde uveden. Výsledky jsou v grafu na obr. 4-10.

Rozměrové tolerance průměrů vycházely z obdobné analýzy a navíc byly předepsány s ohledem na náklady. Skutečná tolerance přesahu byla poloviční (než předepsaná), protože válec z karbidu byl broušen až po vyhotovení ocelového válce. Vnější průměr karbidu byl opraven podle skutečně vyrobeného vnitřního průměru ocelových válců.

Z údajů výstupních kontrol ve výrobních závodech vyplývá, že skutečný přesah mezi ocelovým válcem a válcem z karbidu je o $0,002\text{ mm}$ větší než bylo předepsáno. S ohledem na výpočty v této kapitole má tato nepřesnost spíše pozitivní vliv na bezpečnost.



Obr. 4-10 Závislost maximálního tlaku ve viskozimetru na teplotě

Poznámka:

Návrh válce vycházel z myšlenky, že většinu času bude zařízení nenatlačováno. I když nebude v zařízení tlak, bude na vnitřní povrch válce působit vysoké tlakové napětí. Z tohoto důvodu zde byla zvolena bezpečnost 1,65. Naproti tomu měření viskozit při tlacích nad 1 GPa nebude zcela běžné. Bezpečnost je zde proto nižší. Zařízení umožňuje měření za tlaku 1,5 GPa. Důležité je vyhodnocení únosné míry rizika zničení tlakové nádoby oproti hodnotě dat získaných za extrémních tlaků. Teoreticky může kdykoli za tlaku pod 1 GPa dojít k implozi válce a nad 1 GPa k jeho explozi. Skutečné hodnoty mechanických vlastností, výrobní přesnost, struktura materiálu a další vlivy mohly skutečnou maximální hodnotu tlaku posunout výrazně na oběma směry.

Protože skutečná struktura válce z karbidu nemůže být známa, zařízení nesmí být zatěžováno nad přímkou znázorňující bezpečnost 1 (viz obr. 4-10), ačkoli při ideální struktuře karbidu by zařízení mělo teoreticky vydržet tlak až 2 GPa.

4.3 Měření tlaku a teploty**Měření tlaku**

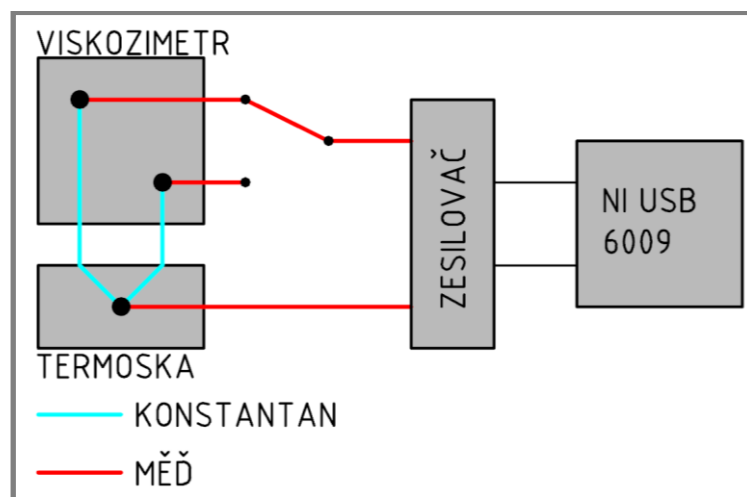
Pro měření tlaku bylo již před započítím diplomové práce koupeno tlakové čidlo pro měření maximálního tlaku až 700 MPa. Čidlo má jediný napěťový výstup o velikosti 0,5 až 10 V.

Protože čidlo umožňuje měřit přibližně do poloviny maximálního tlaku, je tlak měřen nepřímou. Čidlo je zapojeno v zesilovači a na základě předchozí kalibrace se počítá tlak ve viskozimetru. Při kalibraci je tlak v zesilovači odečítán na manometru ruční pumpy. Tlakové ztráty v těsnění rostou s tlakem přibližně lineárně.

Pro připojení tlakového čidla byly zakoupeny součásti doporučené výrobcem. Těsnění je realizováno předepjatým stykem kov na kov. Pro kalibraci tlaku se tlakové čidlo připojuje na místo jednoho z pozorovacích oken přímo do vysokotlakého válce. Způsob připojení do viskozimetru a zesilovače viz obr. 4-2.

Měření teploty

Teplota ve vysokotlakém válci je měřena pomocí termočlánku. Ten je tvořen kombinací měděného a konstantanového drátu (tzv. typ T) o průměru 0,4 mm. Nákres použitého termočlánku je patrný na obr. 4-11.



Obr. 4-11 Schéma zapojení termočlánku

Teplota ve viskozimetru může být měřena na dvou místech. První místo je v horní části, kde se v blízkosti čidla nalézá elektromagnet. Při jeho nešetrném používání může být toto čidlo ovlivněno. Druhé teplotní čidlo se nachází v pístu zesilovače. Zde není přímo v kapalině, ale v její těsné blízkosti.

Dané kombinaci materiálů termočlánku odpovídá termochemické napětí přibližně 0,04 mV/°C [30]. Toto napětí je příliš malé pro přesné měření teploty s měřicí kartou NI USB 6009. Z tohoto důvodu byl zakoupen termočlánekový zesilovač od firmy OMEGA. Přesnost měření teploty ve viskozimetru je v řádu desetin °C.

Přestože teplota může být měřena na dvou místech ve viskozimetru, pro snímání teploty je určen pouze jeden napěťový vstup na měřicí kartě. Uživatel může určit aktuálně používané čidlo pomocí přepínače umístěného na základní elektronické desce.

Druhý konec termočlánku se musí nacházet v oblasti se známou (referenční) teplotou. Aby teplota okolí nemusela být neustále měřena, je „studený konec“

termočlánek umístěn v termosce obsahující vodu s ledem (teplota 0 °C). Konstantí teplota vydrží v termosce déle než 24 hodin.

Pro dostatečnou přesnost měření teploty v celém měřicím rozsahu musí být termočlánek zkalibrován.

4.4 Generování a přenos tlaku

4.4

Vzhledem k extrémně vysokému tlaku, kterému je zkoumaná kapalina vystavena, nelze kapalinu považovat za nestlačitelnou. Minimální objem kapaliny ve viskozimetru je přibližně 7 ml. Při návrhu rozměrů byla uvažována možnost stlačení kapaliny na poloviční objem. Pro dosažení minimální délky vysokotlaké nádoby má píst zesilovače průměr 14 mm (vnitřní průměr ostatních prostor je pouze 10 mm). Pro kompenzaci stlačitelnosti kapaliny, musí být zdvih pístu alespoň:

$$L_p = \frac{4V_{stl}}{\pi D_1^2} = \frac{4 \cdot 7\,000\text{ mm}^3}{\pi \cdot 14^2\text{ mm}^2} = 45\text{ mm},$$

kde

L_p	mm	je zdvih pístu,
V_{stl}	mm ³	stlačitelný objem kapaliny,
D_1	mm	průměr pístu ve viskozimetru.

Pro generování tlaku byla zakoupena hydraulická vysokotlaká ruční pumpa vzor PJ-500 od firmy KGF. Užitečné množství hydraulického oleje je 550 ml, maximální tlak je 70 MPa. Protože vlivem těsnění bude docházet k tlakovým ztrátám, byl zvolen průměr pístu zesilovače $D_2 = 75\text{ mm}$.

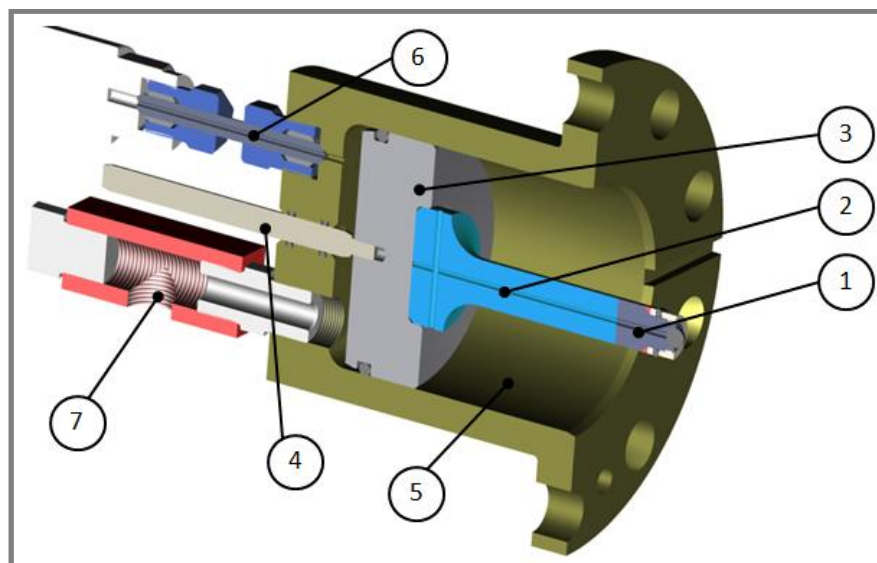
Maximální tlak ve viskozimetru při nezapočítání ztrát vlivem těsnění:

$$P_z = P_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} = 1\,500\text{ MPa} \cdot \frac{14^2}{75^2}\text{ mm}^2 = 52\text{ MPa},$$

kde

P_1	MPa	je tlak ve viskozimetru,
P_z	MPa	tlak v zesilovači,
D_2	mm	je průměr pístu v zesilovači.

Pohyblivý píst se skládá celkem ze tří hlavních částí (čtvrtá část je pro měření posunutí). První část se pohybuje v samotném viskozimetru, je v kontaktu s kapalinou a působí na ni tlak od těsnění a zkoumané kapaliny. Z důvodu extrémního namáhání součástky tlakem je vyrobena z karbidu wolframu. Zbývající část pístu je rozdělena na 2 kusy. V případě porušení bude s největší pravděpodobností zničena prostřední část (2) a nedojde k úniku hydraulické ani zkoumané kapaliny.



Obr. 4-12 Hydraulický zesilovač tlaku

Část z karbidu (1) je přilepena k druhé části pístu. Ta je vyrobena z nástrojové oceli 19 573 podle ČSN. Materiál je zušlechtěn na tvrdost 58 HRC. V první a druhé části pístu se nachází malý axiální otvor. Ten je důležitý pro odvzdušnění vnitřního prostoru viskozimetru před začátkem měření a pro měření teploty.

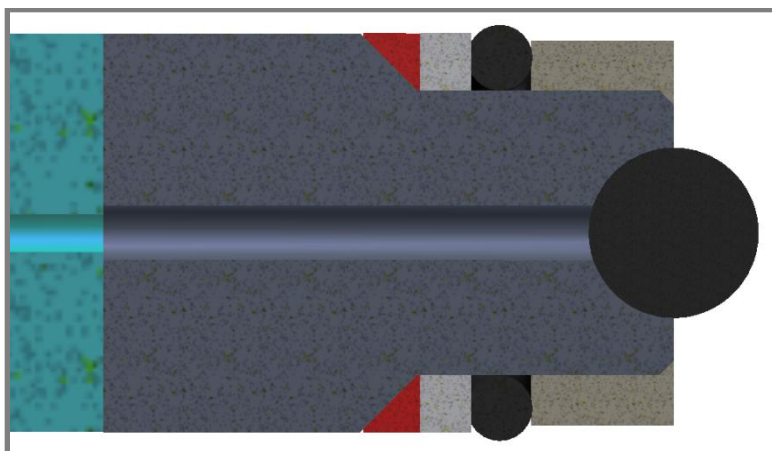
Poslední část pístu (3) se nachází v zesilovači a zajišťuje kontakt s hydraulickou kapalinou. Vyrobena je rovněž z nástrojové oceli. Vzhledem k tloušťce součásti, její tvrdosti a velikosti kontaktní plochy s druhou částí, zde nebude docházet k otláčení povrchu. Bezpečnost vůči překročení meze pevnosti je vyšší než 3.

Samotný zesilovač (5) je k vysokotlakému válci připevněn pomocí 10 šroubů. Souosost je zajištěna kolíky. Dnem zesilovače prochází píst pro měření posunutí (4). Dále se zde nachází otvor pro připojení tlakového čidla (6), připojovací otvor pro hydraulickou pumpu (7) a odvzdušňovací otvor. Na ochranu před korozí je povrch zesilovače černěn.

Zesilovač je zkonstruován tak, aby při výměně kapaliny ve viskozimetru nemusel být rozebírán. Hydraulická kapalina v zesilovači zůstane i po odpojení ruční pumpy. Ta se připojuje pomocí rychlospojky a dalších součástí dodaných výrobcem (7). Způsob výměny a doplnění hydraulické kapaliny je popsán v manuálu v příloze. Pro odvzdušnění zesilovače se může použít ventil v ruční pumpě nebo zátka v samotném zesilovači. Hydraulická kapalina je těsněna pomocí o-kroužků. Použití o-kroužků funguje rovněž jako pojistka před přetlakováním. Pokud by docházelo k jejich předčasnému porušení, musely by být použity navíc opěrné kroužky.

Součást z karbidu (1) má ve svém čele půlkulové zahloubení. Do tohoto místa zapadá kulička (ložisková kulička s průměrem 6 mm), která axiální otvor v pístu utěsní. Ke kuličce je přilepen vlasec vyvedený axiálním otvorem ven ze zesilovače. Otvor je určen pro odvod vzduchu z vnitřního prostoru viskozimetru před začátkem měření. Jakmile bude vnitřní prostor odvzdušněn, zatažením za vlasec

dojde k utěsnění kapaliny. Povrch půlkulového zahloubení je broušen pro splnění těsnicí funkce. Tento způsob těsnění lze použít pro tlaky až 2,5 GPa [26].



Obr. 4-13 Průřez koncem pístu zesilovače

Na obrázku je rovněž patrné těsnění pístu. Je tvořeno zleva kroužkem z beriliového bronzu, teflonovým kroužkem a o-kroužkem. Těsnění je stlačováno našroubováním malého pouzdra na konec pístu.

Výpočet bezpečnosti součásti 1:

Výpočet bezpečnosti byl proveden na zjednodušujícím válcovém tělese podle výpočetních vztahů uvedených na začátku kapitoly. Nebezpečným místem je povrch axiálního otvoru ($r = r_1$).

$$p_1 = 0; \quad p_2 = 1\,500 \text{ MPa}; \quad p_z = 1\,500 \text{ MPa}; \quad \sigma_r = 0 \text{ MPa}$$

Obvodové napětí:

$$\sigma_t = \frac{p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot (-1 - 1) = \frac{1\,500 \text{ MPa} \cdot 5^2 \text{ mm}^2}{(5^2 - 1,5^2) \text{ mm}^2} \cdot (-2) = -3\,300 \text{ MPa}$$

Axiální napětí:

$$\sigma_z = -p_z = -1\,500 \text{ MPa}$$

Redukované napětí dle podmínky max τ :

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_r - \sigma_t = 3\,300 \text{ MPa} - 0 = 3\,300 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tlaku použitého karbidu je 4 900 MPa. Bezpečnost součásti 1 vůči překročení meze pevnosti je 1,48.

Výpočet bezpečnosti součásti 2:

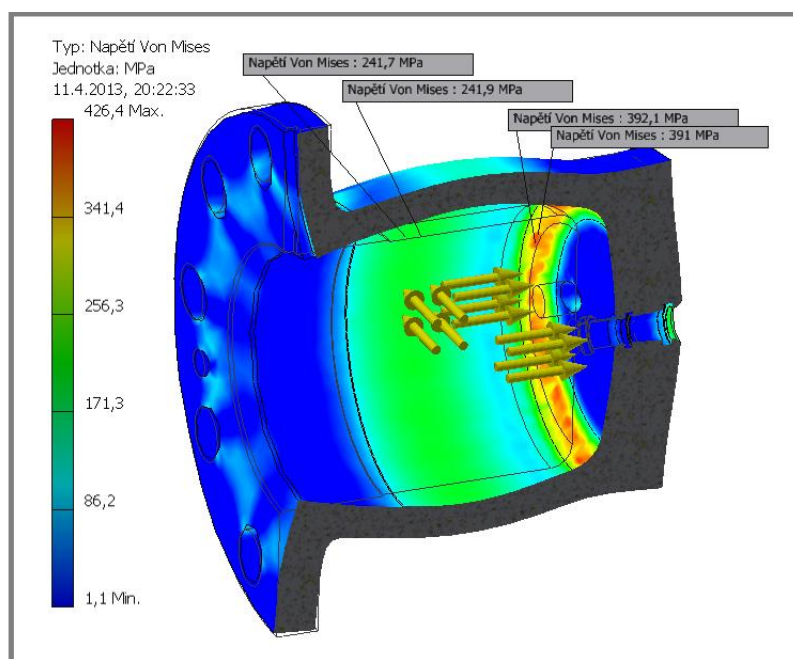
$$\sigma_T = \frac{F_1}{\pi r_3^2} \cdot \alpha = \frac{231\,000 \text{ N}}{\pi \cdot 0,007^2 \text{ mm}^2} \cdot 1,4 = 2\,170 \text{ MPa},$$

kde

σ_T	MPa	je tlakové napětí v druhé části pístu,
F_1	N	síla působící na píst,
r_3	mm	průměr pístu,
α	-	součinitel koncentrace napětí.

Protože mez pevnosti použité oceli v tlaku je 3 100 MPa, je bezpečnost součásti vůči mezi pevnosti 1,43. Nebezpečným místem je změna průměru pístu. Vzhledem k rozměrům součásti nemůže nastat mezní stav ztráty vzpěrné stability prutu.

Bezpečnost zesilovače (5):



Obr. 4-14 MKP analýza zesilovače

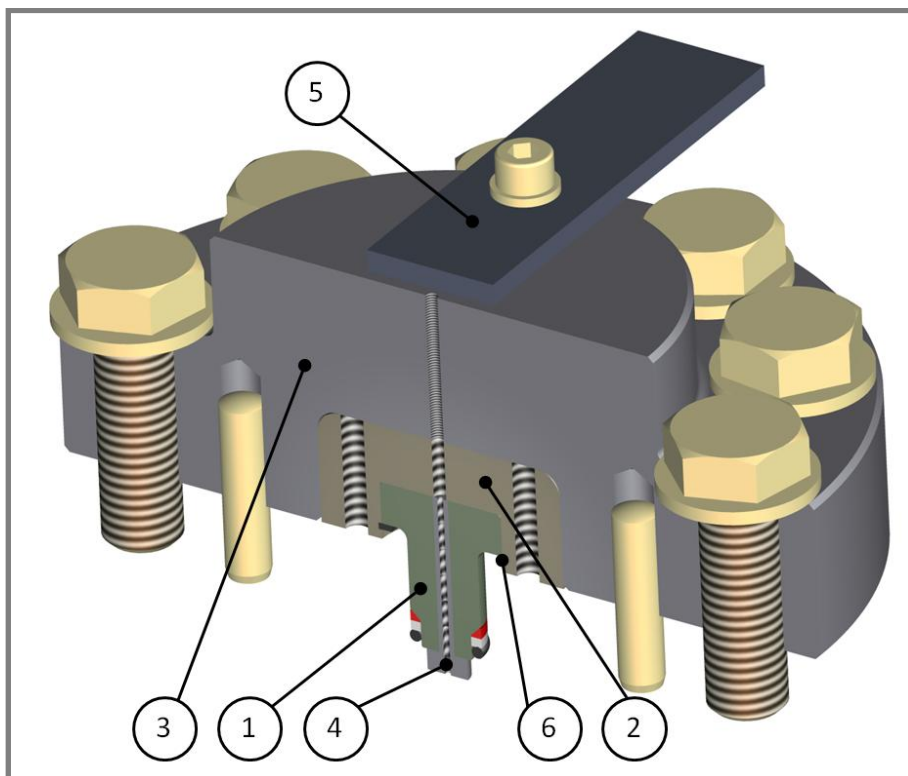
Při MKP analýze byl zesilovač namáhán tlakem o velikosti 60 MPa. Vazby byly umístěny na podložky šroubů (teoreticky maximální vypočítané napětí vzniká právě v ostrých hranách podložek). Maximální redukované napětí v zesilovači dosahuje hodnoty 392 MPa. Jako materiál zesilovače byla vybrána zušlechtěná ocel 16 341 podle ČSN s minimální mezí kluzu materiálu 1 220 MPa. Bezpečnost součásti vůči mezi kluzu je 3,11.

4.5 Uzávěry tlakové nádoby

4.5.1 Konstrukce a těsnění víka

Sestava víka (viz obr. 4-15) musí být demontována při každé výměně zkoumané kapaliny nebo propadávajícího tělíska. Kvůli bezpečnosti, ceně a snadné montáži je víko rozděleno na 3 hlavní součásti.

Karbidový čep (1) je v přímém kontaktu s vysokotlakou kapalinou. Jeho koncová část má stejné rozměry jako konec pístu zesilovače (viz předcházející podkapitola). Bezpečnost vůči překročení meze pevnosti na vnitřním povrchu součásti je 1,48.



Obr. 4-15 Průřez víkem viskozimetru

Vložka (2) je vyrobena opět z nástrojové oceli 19 573 podle ČSN. Do této součásti je převáděna síla působící na píst (230 kN). Vložka slouží jako pojistka, aby nedošlo k porušení víka (3). To by mohlo být velmi nebezpečné z důvodu vystřelení první součásti.

Víko (3) je vyrobeno z běžné oceli 11 523 podle ČSN. Původní vysoká síla je již rozložena na poměrně velkou plochu (průměr kontaktní plochy je 48 mm). Víko je drženo (stejně jako zesilovač) deseti šrouby M14x1,5 zašroubovaných 20 mm do vysokotlakého válce. Souosost víka a válce je zajištěna dvojicí kolíků o průměru 8 mm. Ty jsou uloženy s přesahem ve válci a víko z nich lze snadno sejmut.

Karbidový čep je ve vložce uložen s přesahem. Tyto součásti jsou napevno spojeny, což je důležité pro vodiče vstupující do vnitřního prostoru viskozimetru. Při přehřátí součástí by mohlo dojít k zániku přesahu. Proto je čep navíc zajištěn pojistným kroužkem (6). Naproti tomu vložku lze do víka pouze lehce zasunout. Tím je usnadněna montáž. Po ukončení měření a sejmutí víka lze složku snadno vyjmout z viskozimetru rukou nebo pomocí dvou šroubů M6 (šrouby odtlačí vložku od vysokotlakého válce).

Zátka (4) je rovněž vyrobena z nástrojové oceli. Tato součást je přilepena k čepu a zasunuta do axiálního otvoru, který čepem prochází. K těsnění mezi ocelí a karbidem

dochází samovolně, neboť zátka je k čepu přitlačována hydrostatickou silou. V součásti se nachází závitový otvor M1,4. Tímto otvorem prochází vodiče obsluhující elektromagnet a teplotní čidlo. Vodiče jsou utěsněny epoxidovou pryskyřicí s titanovým plnivem. Její pevnost v tlaku je 90 MPa.

Obyčejný plechový pásek (6) chrání okolí před případným zásahem tlakovou kapalinou při porušení těsnění. Mezi páskem a víkem je vůle 2 mm pro vedení vodičů.

Celá síla F_1 o velikosti 230 kN je přenášena zpět do vysokotlakého válce pomocí šroubů M14x1,5 pevnostní třídy 10.9. Zničení těchto šroubů by mohlo mít závažné důsledky.

Kontrola šroubů na tah (mez kluzu 940 MPa)

Kontrola šroubů na kombinaci tah-krut nebyla provedena, protože utahovací moment šroubu je zanedbatelný vzhledem k axiální síle.

$$\sigma = \frac{F_1}{nA_s} = \frac{16F_1}{n\pi(d_2 + d_3)^2} = \frac{16 \cdot 230 \cdot 10^3 \text{ N}}{10 \cdot \pi(13,026^2 + 12,16^2)\text{mm}^2} = 369 \text{ MPa},$$

kde

σ	MPa	je napětí v tahu,
n	-	počet šroubů,
A_s	mm ²	plocha průřezu šroubu,
d_2	mm	střední průměr závitu šroubu,
d_3	mm	malý průměr závitu šroubu.

Bezpečnost šroubů víka (i zesilovače) vzhledem k mezi kluzu je 2,55.

Kontrola šroubů na otlačení závitu (povolený tlak 200 MPa)

$$p_s = \frac{2F_1}{\pi d_2 L_s n} = \frac{2 \cdot 230 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot 13,026 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 10} = 56 \text{ MPa},$$

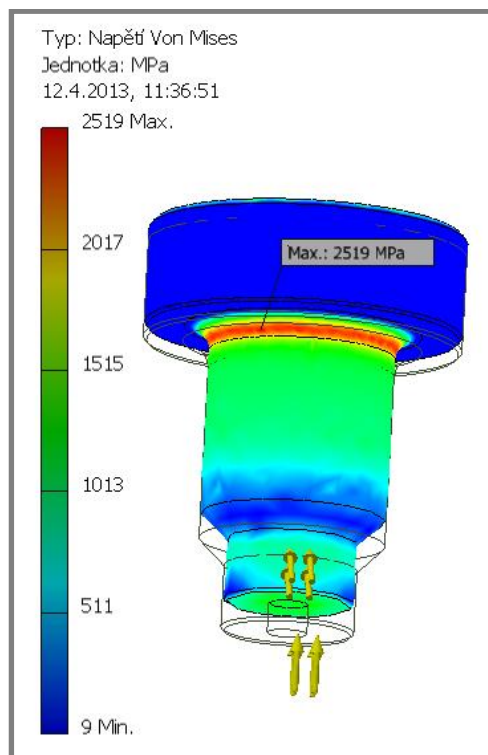
kde

p_s	MPa	je tlak v závitech,
L_s	mm	funkční délka závitu šroubu,
P_s	mm	rozteč závitu šroubu.

Bezpečnost šroubů víka (i zesilovače) proti otlačení závitu je 3,6.

MKP analýza setavy víka

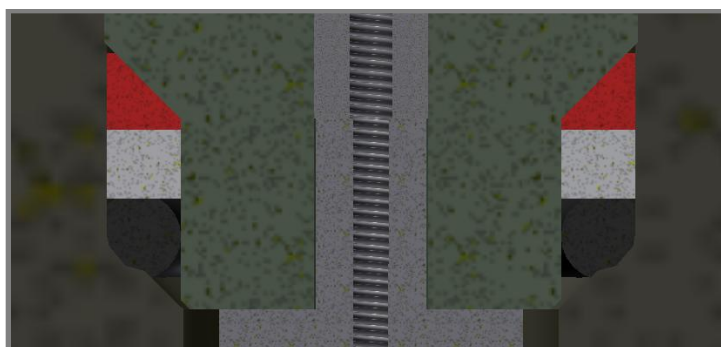
MKP analýza byla provedena společně pro součásti 1, 2 a 3. Čelní plochy čepu byly zatíženy tlakem 1 570 MPa. Vazby byly aplikovány na podložky a kolíky. Výsledky MKP analýzy nejdražší součásti jsou na obr. 4-15. Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti je 1,94. Bezpečnost druhé součásti vůči otlačení je 1,1. Bezpečnost třetí součásti vůči meznímu stavu pružnosti je 2,5. Z výsledků vyplývá, že nejohroženější je druhá součást. Při jejím porušení ovšem nehrozí nebezpečí pro uživatele ani okolí.



Obr. 4-16 MKP analýza karbidového čepu víka

Těsnění víka

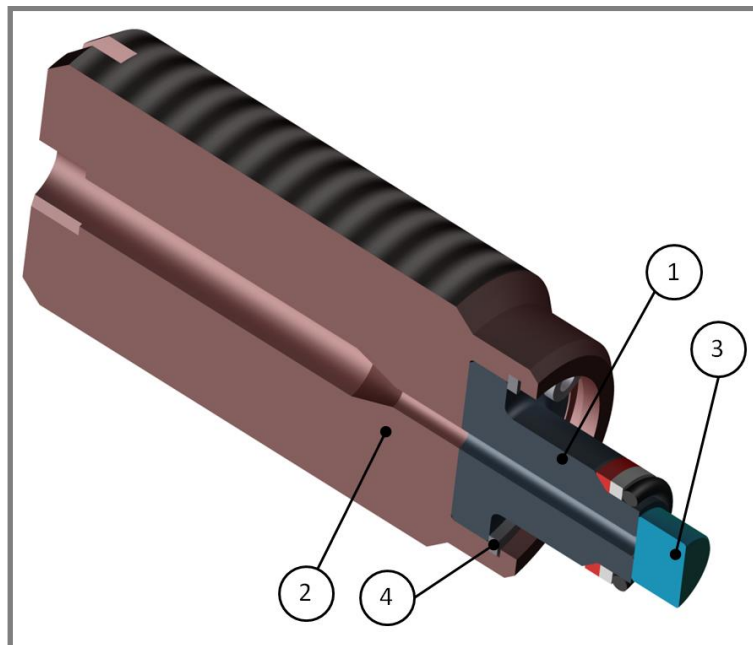
Jako těsnění byla vybrána 3-stupňová varianta „měkkéko“ těsnění. První stupeň je tvořen o-kroužkem z materiálu nitril-butadien-kaučuk o tvrdosti 90 shore. Při minimální šířce spáry udává výrobce těsnost do tlaku 50 MPa [32]. Počáteční stlačení o-kroužku zajišťuje samotný tvar vysokotlaké nádoby (viz obr. 4-17). Druhým stupněm je teflonový kroužek čtvercového průřezu široký 2 mm. Odolnost druhého stupně je odhadována do 150 MPa. Poslední stupeň je kroužek trojúhelníkového průřezu z beriliového bronzu o tvrdosti 250 HV. Bronzový kroužek nemá ostré hrany a je vtlačován do spáry. Použitý o-kroužek limituje pracovní rozsah teplot podle požadavků zadání. Pro měření za vyšších nebo nižších teplot, musejí být o-kroužky z jiného materiálu.



Obr. 4-17 Průřez vysokotlakým těsněním

4.5.2 Konstrukce a těsnění pozorovacích oken

Oproti axiálnímu otvoru se radiální otvory rozšiřují na průměr 12 mm (axiální na 14 mm). Menší průměr je postačující, protože uvnitř pozorovacích oken nemusí procházet vodiče, ale pouze světelný paprsek.



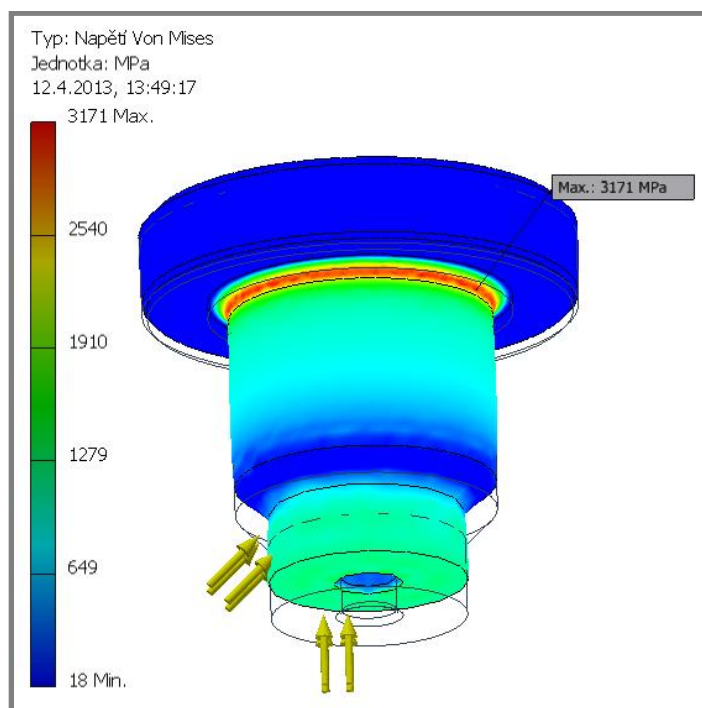
Obr. 4-18 Průřez pozorovacím oknem

Čep (1) je vyroben z karbidu wolframu. Jeho tvar je téměř totožný s obdobnou součástí v sestavě víka. Bezpečnost čepu na povrchu axiálního otvoru vůči mezi pevnosti je 1,51. Součást 1 je uložena v čepu (2), který se šroubuje do vysokotlakého válce závitem M30x2. Poloha karbidového čepu (1) je zajištěna pojistným kroužkem (4). Uvnitř čepu je rozšiřující se axiální otvor. Do něho se při měření umísťuje fotodioda pro detekci tělíska.

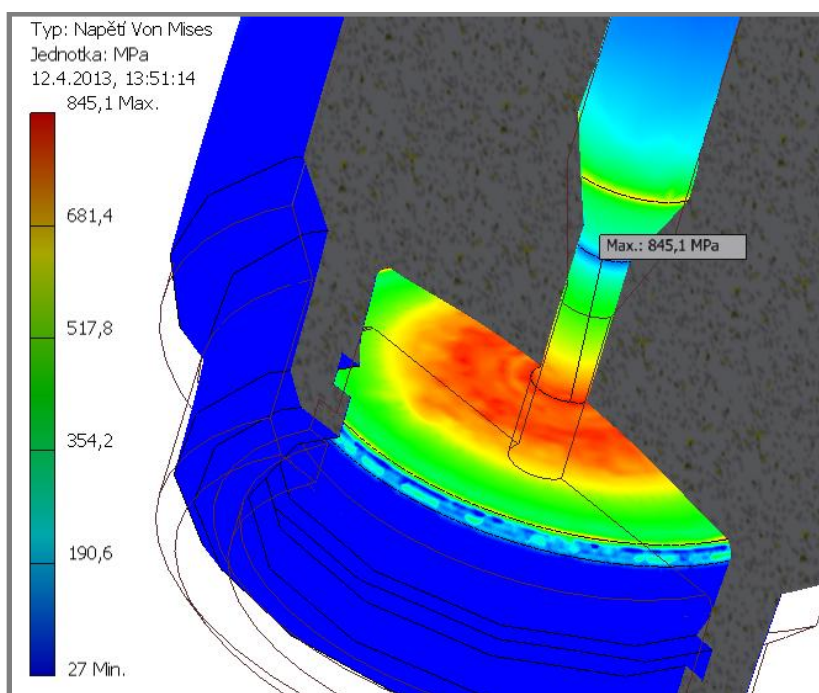
Safírové sklo (3) je přilepeno na čelní plochu první součásti. Pro správnou těsnicí funkci byl povrch čepu vyroben s drsností Ra 0,2. Okraje axiálního otvoru jsou zaobleny a drsnost povrchu zaoblení je také Ra 0,2. Podle literatury [28] se jedná o takzvaný *Poulterův typ* těsnění a lze jej použít pro těsnění kapaliny za tlaku až 3 GPa za předpokladu optické kvality kontaktních ploch. Před samotnou montáží byly čelní plochy čepů leštěny diamantovou pastou.

Při MKP analýze byl tlak o velikosti 1 570 MPa aplikován na čelní plochy čepu. Součásti 1 a 2 byly vyšetřovány společně. Zavazbení bylo provedeno na závitech druhého čepu. Bezpečnost čepu z karbidu vůči mezi pevnosti je 1,45.

Druhý čep (2) je vyroben oceli 19 573 podle ČSN zušlechtěné na tvrdost 58 HRC. Bezpečnost součásti vzhledem k mezi pevnosti je 3,67. Oproti předchozím konstrukčním uzlům není u pozorovacího okna použita prostřední část. Protože průměr pozorovacího okna je menší, působí na součásti výrazně nižší axiální síla F_1 .



Obr. 4-19 MKP analýza karbidového čepu okna



Obr. 4-20 MKP analýza závitového čepu okna

Axiální síla působící na pozorovací okno:

$$F_1 = P_1 \pi r_3^2 = 1\,500 \text{ MPa} \cdot \pi \cdot 6^2 \text{ mm}^2 = 170 \cdot 10^3 \text{ N},$$

kde

P_1 MPa
 r_3 mm

je maximální tlak ve viskozimetru,
poloměr plochy pístu, na kterou působí kapalina.

Kontrola čepu na tlak

$$\sigma_T = \frac{F_1}{A_s} = \frac{16F_1}{\pi(d_2 + d_3)^2} = \frac{16 \cdot 170 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi(28,701^2 + 27,564^2)\text{mm}^2} = 547 \text{ MPa},$$

kde

σ_T	MPa	je napětí v tlaku,
A_s	mm ²	plocha průřezu čepu,
d_2	mm	střední průměr závitu čepu,
d_3	mm	malý průměr závitu čepu.

Bezpečnost čepu vzhledem k mezi pevnosti je 5,67.

Kontrola čepu na otláčení závitu

$$p_s = \frac{2F_1}{\pi d_2 L_s} = \frac{2 \cdot 170 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot 28,701 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}} = 94 \text{ MPa},$$

kde

p_s	MPa	je tlak v závitech,
L_s	mm	funkční délka závitu šroubu,
P_s	mm	rozteč závitu šroubu.

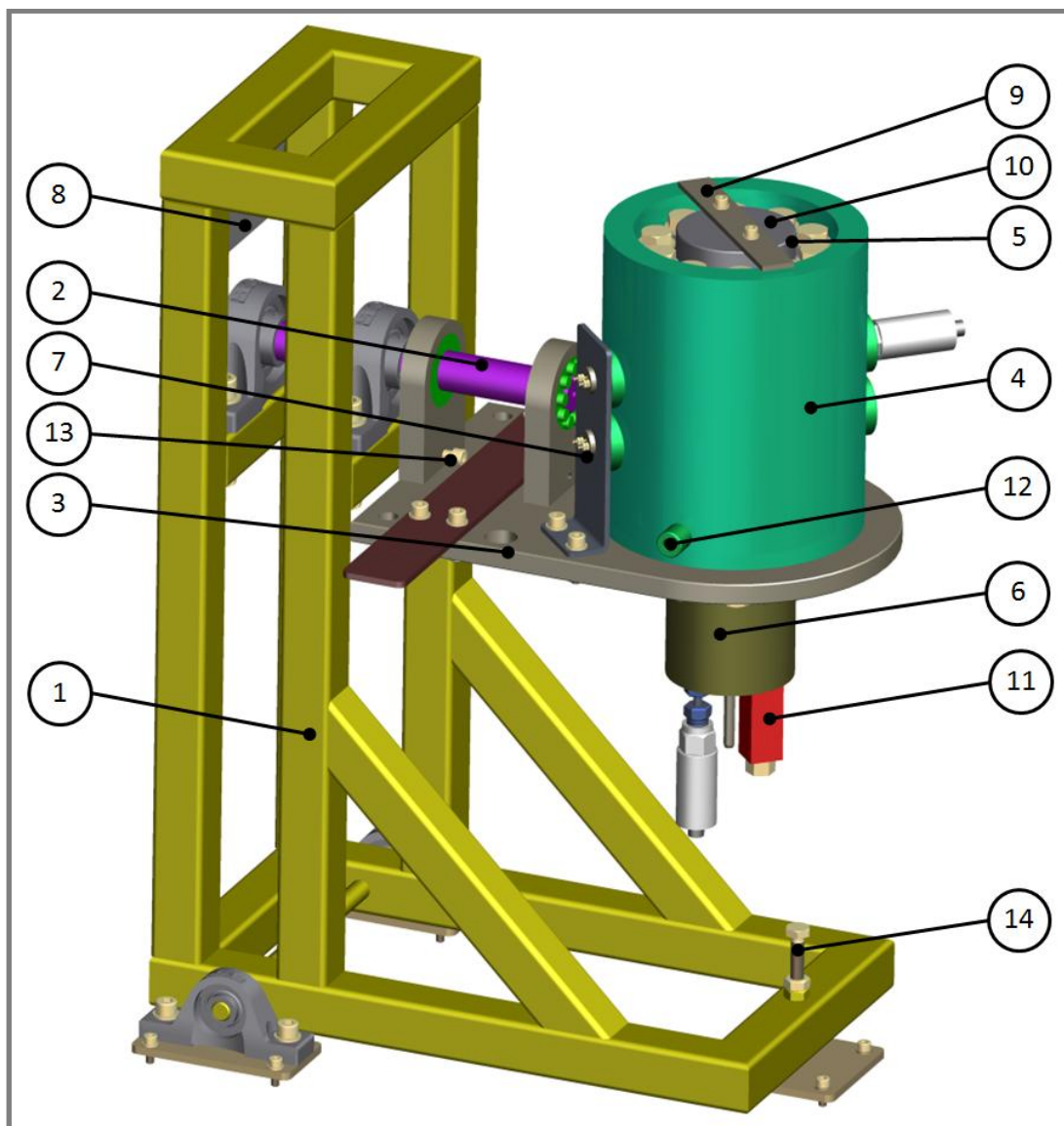
Vzhledem k použitým materiálům je maximální povolený tlak v závitech stanoven na 250 MPa. Bezpečnost závitu čepu vůči otláčení je 2,66.

Těsnění mezi čepem a vysokotlakým válcem je shodné s těsněním víka (viz obr. 4-18).

4.6 Vnější konstrukce zařízení a regulace teploty

Vnější konstrukce viskozimetru je určena pro připevnění na stůl v laboratoři Ústavu konstruování. Konstrukce umožňuje snadný přístup obsluhy k zařízení. Pro minimalizaci fyzické námahy je těžiště pohyblivých částí přibližně 5 mm pod osou rotace. Viskozimetr má tendenci setrvávat ve vertikální poloze a není náročné jej otočit pro resetování polohy tělíska nebo pro měření v opačném směru. Po odmontování zesilovače se těžiště přemístí přibližně do osy rotace. Následné otáčení zařízením je pak zcela bezproblémové.

1	Vnější kostra	8	Elektronická deska
2	Hřídel	9	Ukotvení temperačního válce
3	Základní deska	10	Bublinková vodováha
4	Temperační válec	11	Přívod hydraulické kapaliny
5	Vysokotlaký viskozimetr	12	Přívod temperační kapaliny
6	Hydraulický zesilovač tlaku	13	Aretace polohy
7	Osvětlení	14	Nastavování polohy



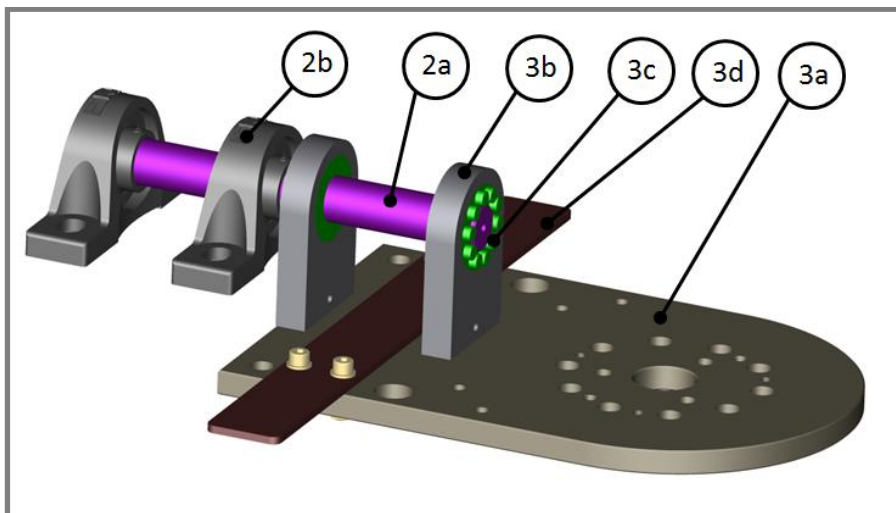
Obr. 4-21 3D model zařízení

Celková hmotnost zařízení je přibližně 85 kg. Necelá polovina hmotnosti (35 kg) připadá na kostru zařízení (1). Podstatnou část hmotnosti tvoří také vysokotlaký válec (25 kg) a temperační válec (11 kg).

Vysokotlaký válec (5) je spojen se základní deskou (3) třemi šrouby M10 a kolíky. Zesilovač (4) se montuje k desce až po viskozimetru. Připojuje se šrouby M14 přímo do viskozimetru. Montáž víka je obdobná. Vnější konstrukce zařízení byla navržena za účelem zajištění podmínek pro jeho správnou funkci.

Resetování polohy tělíska

Viskozimetr je upevněn na základní desce (3a). Ta je se součástmi 3b spojena šrouby M8 a kolíky. Ty jsou použity, aby šrouby byly namáhány pouze axiální silou. Hřídel (2a) je s deskou pevně spojena pomocí svěrných pouzder TLK-200 (3c). Ložiskové jednotky (2b), ve kterých je hřídel uložena, jsou připevněny ke kostře (1). Jednodušší otáčení viskozimetrem umožňuje připevněné madlo (3d).



Obr. 4-22 3D model uchycení základní desky a hřídele

Hřídel je tvořena trubicí o vnějším průměru 30 mm a vnitřním 6 mm. Vnitřním otvorem prochází vodiče k elektronické desce, termočláňkovému zesilovači a měřicí kartě. Pro vedení vodičů rovněž slouží některé otvory v základní desce. Veškeré součásti jsou předimenzovány, aby se minimalizovala jejich deformace negativně ovlivňující kolmost viskozimetru.

Kolmost viskozimetru

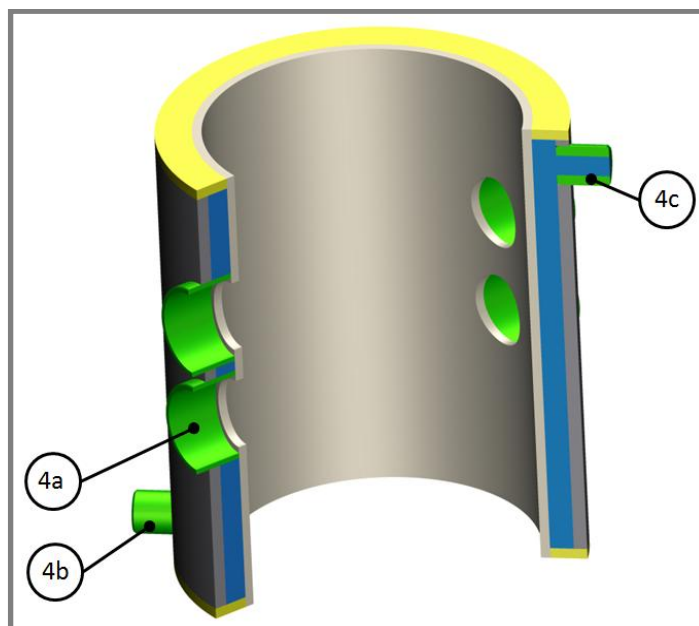
Ke kontrole kolmosti viskozimetru bude na jeho vrchní část přilepena bublinková vodováha (10). Celá kostra (1) se může naklánět na dvou ložiskových domcích. Přesné nastavení roviny se provádí pomocí šroubu M10 (14). Kolmost musí být kontrolována před každým měřením. Ačkoli těžiště viskozimetru leží pod osou otáčení, nemusí být přímo ve vertikální ose viskozimetru (vlivem připojených kabelů a hadic). Z tohoto důvodu musí být správná poloha viskozimetru zajištěna pomocí šroubu (13).

Regulace teploty ve viskozimetru

Pro regulaci teploty je na tlakovou nádobu viskozimetru nasunut dvouplášťový temperační válec s nuceným oběhem kapaliny. Válec se připojuje k temperačnímu okruhu pomocí hydraulických spojek se závitem M14x1,5. Ty se šroubují ke vstupnímu (4b) a výstupnímu (4c) otvoru. Ve válci jsou 4 průchozí radiální otvory (4a) umožňující optickou detekci tělíska ve viskozimetru.

Samotný válec je svařen z běžných hutních polotovarů. Pro optimální přenos tepla mezi temperačním válcem a viskozimetrem je vnitřní povrch válce po svaření soustružen. Jeho masivní konstrukce poskytuje ochranu v případě prasknutí tlakové nádoby.

Po vyrobení temperačního válce byla provedena zkouška těsnosti svarů tlakem 0,3 MPa. Vnější povrchy válce jsou lakovány. Vnitřní plochy nemohly být lakovány. Je nutné používat temperační kapalinu s antikorozií přísadou.



Obr. 4-23 Průřez 3D modelem temperačního válce

4.7 Analýza rizik

4.7

Specifická konstrukce viskozimetru umožňuje stlačení zkoumané kapaliny až na poloviční objem za maximálního tlaku 1,5 GPa. Za zjednodušujícího předpokladu, že tlak v kapalině roste lineárně s posunutím, může být maximální energie akumulovaná v kapalině:

$$E_k = \frac{1}{2} P_1 \Delta V = \frac{1}{2} 1,5 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 5,25 \text{ kJ},$$

kde

E_k	kJ	je maximální energie akumulovaná v kapalině,
P_1	Pa	maximální povolený tlak v kapalině,
ΔV	m ³	maximální možná změna objemu kapaliny ve viskozimetru.

Tato energie se může náhle uvolnit náhodnou kombinací možností popsaných níže.

Rázová vlna

V případě zničení tlakové nádoby se maximálně 80 % celkové energie může uvolnit ve formě rázové vlny. Lidský organismus rázovou vlnu zaznamená jako hluk. Jeho síla je definována tlakem vzduchu v určité vzdálenosti od zdroje. Pokud tlak může překročit 0,07 bar, obsluha zařízení by měla použít ochranné pomůcky.

Tlak vyvolaný rázovou vlnou ve vzdálenosti 1,5 m [28]:

$$\begin{aligned}
 P_r &= 8,45 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{0,8E}}{R_{vzd}} \right)^{2,3} - \frac{0,16 R_{vzd}}{\sqrt[3]{0,8E}} + 0,06 \\
 &= 8,45 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{0,8 \cdot 5 \cdot 250 \text{ J}}}{1,5 \text{ m}} \right)^{2,3} - \frac{0,16 \cdot 1,5 \text{ m}}{\sqrt[3]{0,8 \cdot 5 \cdot 250 \text{ J}}} + 0,06 \\
 &= 0,065 \text{ bar},
 \end{aligned}$$

kde

P_r bar je tlak vyvolaný rázovou vlnou,
 R_{vzd} m bezpečná vzdálenost z hlediska zasažení tlakovou vlnou.

Ve vzdálenosti větší než 1,5 m od zařízení nehrozí dočasné poškození sluchu v případě zničení tlakové nádoby. Při měření za tlaku nad 1 GPa by se obsluha zařízení neměla přibližovat ke stroji na kratší vzdálenost bez ochranných prostředků.

Únik vysokotlaké kapaliny

Nebezpečný únik vysokotlaké kapaliny je charakterizován paprskem schopným poranit nechráněnou kůži. U daného zařízení k tomu může dojít pouze dvěma způsoby:

- **Prasknutí safírového skla:** Skla jsou použita u pozorovacích oken a jsou v přímém kontaktu s vysokotlakou kapalinou a okolním vzduchem. Jejich porušením dojde k prudkému výstřiku kapaliny z vysokotlakého válce radiálním směrem. Pokud by se safírové sklo porušilo na straně osvětlení, střepy a paprsek by byly zachyceny držákem osvětlení vyrobeným ze silného plechu. Při porušení skla na straně fotodiody zachytí paprsek obdobný plech, který zde nemá jiný účel a při tlacích do 1 GPa nemusí být instalován.
- **Porušení těsnění vodičů ve víku:** Vodiče procházející malým axiálním otvorem ve víku jsou utěsněny epoxidovou pryskyřicí. Při porušení těsnění bude paprsek zachycen plechem o šířce 5 mm, který je přišroubován 2 mm nad víko (viz obr. 4-16).

Je přísně zakázáno dívat se přímo do radiálních otvorů a otvoru ve víku.

Projektil

V případě destrukce zařízení se mohou vyskytnout dva druhy letících projektilů. První z nich vzniknou při roztržení tlakové nádoby. V tomto případě se může až 60 % energie [28] přeměnit na kinetickou energii různě velkých fragmentů původní nádoby. Ty se mohou pohybovat rychlostí vyšší než 50 m/s. Ochranou před tímto nebezpečím je temperační válec nasunutý na tlakovou nádobu. Jeho mohutná dvouplošná konstrukce bezpečně zachytí celou energii případné exploze.

Druhým typem projektilu může být vystřelené víko nebo pozorovací okno. Před vystřelením okna je obsluha chráněna stejně jako při případném porušení safírového skla. Proti vystřelení víka není instalována žádná dodatečná ochrana.

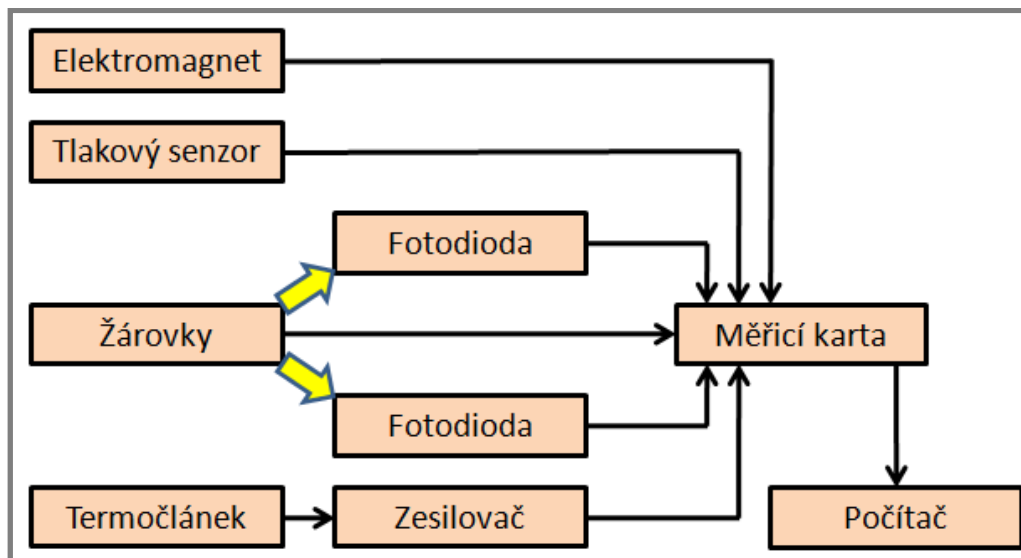
Vystřelení víka nebo okna je velmi nepravděpodobným nebezpečím. Bezpečnostní výpočty byly prováděny s dostatečnou rezervou. Chyba uživatele (podstatné překročení maximálního povoleného tlaku) povede dříve k porušení těsnění v zesilovači než ke stržení závitů a vystřelení projektilu.

Další rizika spojená s používáním viskozimetru

- popálení o temperační válec
- vyrážka po manipulaci s beriliovým bronzem
- vdechnutí výparů používaných kapalin

4.8 Elektrické obvody

Součástí viskozimetru jsou také elektrické obvody. Jejich správné sestavení je podmínkou pro získání kvalitních výsledků měření. Před jejich samotným návrhem bylo nutné určit způsob měření a sestavit měřicí řetězec.



Obr. 4-24 Schéma měřicího řetězce

Elektromagnet drží tělísko před začátkem měření. Pro vyhodnocovací software je okamžik vypnutí elektromagnetu důležitý a musí být sledován jeho stav. Stejným způsobem program sleduje i zapnutí osvětlení pro vytvoření optických závor.

Tlakový senzor má výstupní napětí v rozsahu 0,5 až 10 V. Jeho vstupní napětí musí být 15 až 30 V. Na základě požadavků senzoru byl vybrán stabilizovaný 24 V zdroj o maximálním výkonu 120 W.

Pro detekci tělísek slouží dvojice halogenových 12 V/16 W žárovek. Světlo žárovky dopadá na fotodiody typu BPW 34, které jsou zapojeny v závěrném směru. S rostoucím osvětlením fotodiody, klesá její odpor. Při osvětlení fotodiody svítí seriově zapojená LED dioda a lze na ní naměřit vyšší napětí.

Na obr. 4-25 je schéma zapojení obvodů včetně připojení k měřicí kartě NI USB 6009. Tato karta musí být softwarově nastavena pro příslušné vstupy. Popis nastavení lze nalézt ve zdrojovém kódu vyhodnocovacího programu.

Jednotlivé smyčky elektrického obvodu byly navrženy pomocí Kirchhoffových zákonů. Parametry součástek pocházejí z údajů poskytnutých výrobcem. Vodiče jsou považovány za ideální, s výjimkou tenkého měděného drátu, kterým je tvořeno vinutí elektromagnetu.

Návrh elektromagnetu

Na trhu se nepodařilo najít vhodný elektromagnet pro použití v dané aplikaci. Z tohoto důvodu (a po inspirování se u obdobných zařízení) byl vyroben vlastní jednoduchý elektromagnet. Jádrem je tvořeno tyčkou z magneticky měkkého

železa o průměru 5 mm a délce 10 mm. Vinutí elektromagnetu tvoří měděný lakovaný drát o průměru 0,2 mm a délce 2 m.

Odpor vinutí elektromagnetu:

$$R_{\text{elm}} = \rho_m \cdot \frac{l}{S} = 0,0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{4 \cdot 2 \text{ m}}{\pi \cdot 0,2^2 \text{ mm}^2} = 1,1 \Omega ,$$

kde

R_{elm} Ω

ρ_m $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

l m

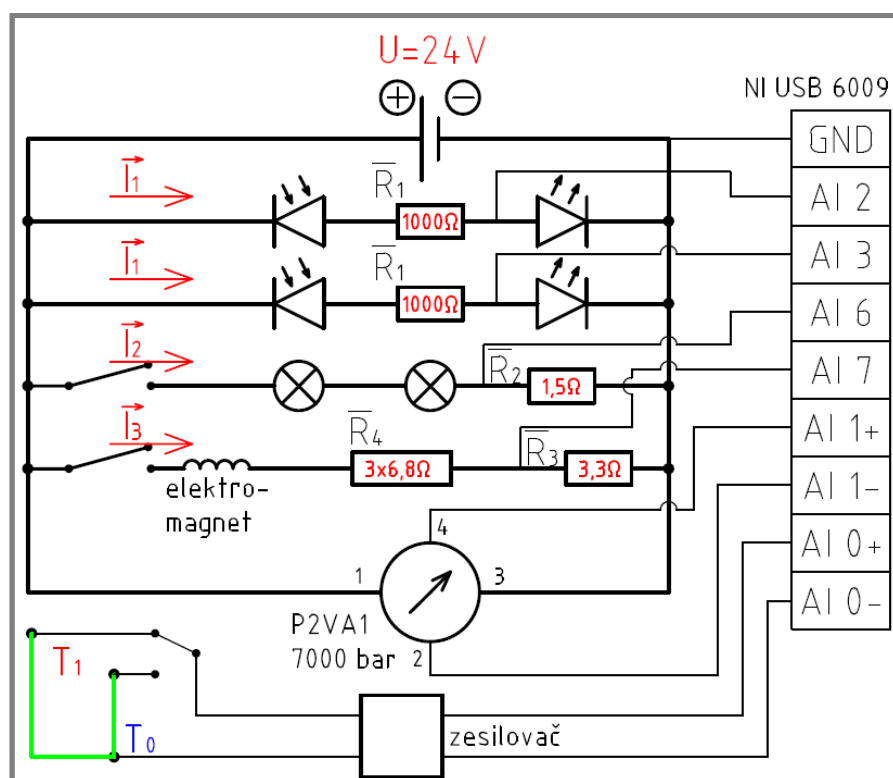
S mm^2

je odpor vinutí elektromagnetu,

měrný odpor měděného vodiče,

délka vodiče tvořícího vinutí elektromagnetu,

plošný obsah průřezu vodiče.



Obr. 4-25 Schéma zapojení obvodů

Návrh rezistoru \overline{R}_1 :

Odpor osvětlené fotodiody je považován za zanedbatelný. Pro LED diodu výrobce doporučuje napětí 2,2 V a proud 20 mA.

$$\overline{R}_1 = \frac{U - U_{\text{LED}}}{I_1} = \frac{(24 - 2,2)\text{V}}{0,02 \text{ A}} = 1\,090 \Omega ,$$

kde

\overline{R}_1 Ω

U V

U_{LED} V

I_1 A

je odpor rezistoru,

výstupní napětí zdroje,

požadované napětí na LED diodě,

požadovaný proud procházející LED diodou.

Výkon rezistoru $\overline{R_1}$:

$$P_{R1} = I_1^2 \cdot \overline{R_1} = 0,02^2 \text{ A}^2 \cdot 1\,090 \, \Omega = 0,44 \text{ W},$$

kde

P_{R1} W je výkon rezistoru.

Na základě výpočtů byl zvolen rezistor o odporu 1 k Ω a maximálním výkonu 1 W.

Návrh rezistoru $\overline{R_2}$:

Pokud by v obvodu byly zapojeny samotné halogenové žárovky, napětí na jejich vstupech by mělo velikost 12 V. Měřicí karta s daným nastavením je schopna měřit maximální napětí o velikosti 10 V. Z tohoto důvodu je se žárovkami sériově zapojen rezistor. Ten je navržen tak, aby napětí na každé žárovce bylo 11 V a jejich výkon byl 15 W.

Proud procházející žárovkami:

$$I_2 = \frac{P_Z}{U_Z} = \frac{15 \text{ W}}{11 \text{ V}} = 1,36 \text{ A},$$

kde

I_2 A je proud procházející žárovkami,

P_Z W požadovaný výkon žárovky,

U_Z V požadované napětí na žárovce.

$$\overline{R_2} = \frac{U - 2U_Z}{I_2} = \frac{(24 - 2 \cdot 11) \text{ V}}{1,36 \text{ A}} = 1,47 \, \Omega,$$

Výkon rezistoru $\overline{R_2}$:

$$P_{R2} = I_2^2 \cdot \overline{R_2} = 1,36^2 \text{ A}^2 \cdot 1,47 \, \Omega = 2,72 \text{ W},$$

kde

P_{R2} W je výkon rezistoru.

Na základě výpočtů byl vybrán rezistor o odporu 1,5 Ω a maximálním výkonu 5 W.

Návrh rezistorů $\overline{R_3}$ a $\overline{R_4}$:

Po několika pokusech bylo zjištěno, že optimální proud procházející daným elektromagnetem je 1 A. Tento proud vytváří na samotném elektromagnetu pouze minimální napětí. Pro snímání stavu je proto nutné zařadit ještě jeden rezistor $\overline{R_3}$ (předběžná hodnota jeho odporu 3 Ω). Další rezistor $\overline{R_4}$ (podstatně silnější) musí být zařazen pro dosažení požadovaného proudu.

$$\overline{R_4} = \frac{U - I_3 \overline{R_3}}{I_3} = \frac{24 \text{ V} - 1 \text{ A} \cdot 3 \, \Omega}{1 \text{ A}} = 21 \, \Omega,$$

kde

$\overline{R_3}$ Ω je odpor rezistoru,

$\overline{R_4}$	Ω	odpor rezistoru,
I_3	A	proud procházející elektromagnetem.

Výkon rezistoru $\overline{R_3}$:

$$P_{R3} = I_3^2 \cdot \overline{R_3} = 1 \text{ A}^2 \cdot 3 \Omega = 3 \text{ W},$$

kde

P_{R3} W je výkon rezistoru.

Výkon rezistoru $\overline{R_4}$:

$$P_{R4} = I_4^2 \cdot \overline{R_4} = 1 \text{ A}^2 \cdot 21 \Omega = 21 \text{ W},$$

kde

P_{R4} W je výkon rezistoru.

Na základě výpočtů a při zohlednění aktuální nabídky rezistorů byl zvolen jeden rezistor o odporu $3,3 \Omega$ a maximálním výkonu 10 W a 3 rezistory o odporu $6,8 \Omega$ a maximálním výkonu 20 W .

4.9 Vyhodnocovací software

Software je vytvořený ve vývojovém prostředí Matlab R2011b. Kromě základní verze Matlabu jsou pro spuštění programu nutné knihovny Data Acquisition Toolbox a Symbolic Math Toolbox. Pro plné využití funkcí programu je dále potřeba Statistics Toolbox a Curve Fitting Toolbox. Existuje také verze programu spustitelná na 64-bit počítačích bez nainstalovaného Matlabu. Tato verze nepodporuje některé vedlejší funkce.

Samotný zdrojový kód programu několikanásobně přesahuje délku textu diplomové práce a je přiložen pouze jako příloha v elektronické formě. Podrobnější popis jednotlivých částí programu, způsoby kalibrací, výpočtů, korekcí a přenastavení parametrů je uveden v příloze.

Základní popis programu

Cílem programu je minimalizovat množství práce člověka při vlastním měření a vyhodnocování výsledků měření. Základním modulem programu je část zabývající se měřením viskozity. V této části si program načte dříve provedené kalibrace tlaku, teploty a zvoleného propadávajícího tělíska. Po zvolení akce *Měření* program načítá data z měřicí karty (6 vstupů, rychlost snímání $8\,000 \text{ Hz}$, získaná data vyhodnocuje s frekvencí 4 Hz), zobrazuje hodnoty teploty a tlaku, kontroluje stav osvětlení a elektromagnetu a polohu tělíska. V průběhu měření je nutné do programu zadávat pouze posunutí pístu pro určení hustoty kapaliny. Veškeré potřebné korekce vlivem tlaku a teploty program automaticky zahrne do výpočtu.

Po ukončení měření (nebo v jeho průběhu) může uživatel výsledky měření uložit. Aby bylo minimalizováno riziko ztráty dat, po jakékoli akci uživatele se ukládá záloha. Tu lze v případě problémů načíst. Druhá záloha se ukládá každý den při začátku měření.

Pouze poslední část programu (Export dat) nepotřebuje ke spuštění připojení měřicí karty. V této části si může uživatel prohlížet naměřená data všech ostatních uživatelů, exportovat data do programu excel, anebo data třídit pro vytváření grafů. Při exportu dat se o každém měření uloží následující informace: Datum a čas měření, Číslo tělíska, Verze kalibrace tělíska, Doba pádu tělíska, Tlak, Teplota, Hustota kapaliny, Viskozita, Rychlost tělíska, Kalibrační konstanta, Kalibrační konstanta po korekcích a Smykové napětí mezi stěnou viskozimetru a propadávajícím válcem.



Obr. 4-26 Ukázka uživatelského rozhraní části programu pro měření viskozity

Kromě již zmíněných modulů pro měření viskozity a export dat, program obsahuje moduly pro kalibraci propadávajících tělísek, kalibraci tlaku a kalibraci teploty. V programu má každý uživatel svůj uživatelský účet, který obsahuje pouze jím provedená měření. Vekere kalibrace jsou společné pro všechny uživatele. Cizí data ostatní uživatelé mohou vidět v modulu Export dat, ale nemohou je žádným způsobem upravovat.

4.10 Výroba a montáž zařízení

4.10

Vysokotlaký viskozimetr je poměrně drahé zařízení. Jeho celková cena a cena jednotlivých důležitých celků je uvedena v tab. 5-3.

Tab. 4-3 Celkové náklady na zařízení

Dodavatel	Odkaz	Specifikace	Cena s DPH (Kč)
Výroba SOMA	www.soma.cz	objednávka v příloze	217 800
Výroba CERATIZIT	www.ceratizit.com	objednávka v příloze	106 000
Tlakové čidlo	www.hbm.cz	P2VA1/7000bar	32 722
Hydraulická pumpa a příslušenství	www.kgf.cz	objednávky v příloze	16 889
Zkoušky mechanických vlastností	ÚMVI	Tah, ráz, ohyb	12 700
Měřicí karta a příslušenství	czech.ni.com	NI USB 6009	7 465
Safírová skla	www.knightoptical.com	pr. 8mm/ tl.6 mm; 6 ks	5 400

Dodavatel	Odkaz	Specifikace	Cena s DPH (Kč)
Součásti tlakového čidla	www.curtisswright.com	objednávka v příloze	4 780
Ložiskové domky	www.arkov.cz	SYJ 30 TF; 2 ks	3 444
		SY 15 TF; 2 ks	
O-kroužky	www.sittech.cz	nabídka v příloze	2 244
Spojovací materiál			1 863
Stabilizovaný zdroj napětí	www.ges.cz	MW 24V/5A	1 408
Karbidová kulička	www.redhill-balls.cz	6 mm; 1ks	1 037
Svěrná pouzdra	www.teatechnik.cz	TLK200-30x55; 2 ks	845
Expoxid s titanovým plnivem	www.hfmarket.cz	M 8110	774
Elektronické součásti	www.ges.cz		620
			420 891

Kompletní výkresová dokumentace byla hotova na začátku listopadu 2012. Od té doby bylo jednáno s výrobcí ohledně cenových nabídek a výrobních postupů. Nejkomplikovanější součástí je vysokotlaká nádoba. Ta byla dodána 6 dní před odevzdáním diplomové práce. Příčinou byla její postupná výroba v ČR, Lucembursku a opět v ČR. Měsíční zpoždění výroba nabrala kvůli dodavateli, který poskytl špatný materiál. Chyba byla odhalena v průběhu lisování ocelových válců. Dodavatel uznal svou chybu, dodal nový materiál a zaplatil opakovanou výrobu.

V průběhu montáže se nevyskytly žádné podstatné problémy se sestavením zařízení po mechanické i elektronické stránce. Ve vyhodnocovacím programu muselo být provedeno několik drobných změn v nastavení parametrů. V době odevzdání diplomové práce fungovalo měření rychlosti padajících tělísek bez problémů. Měření teploty vykazovalo nestabilní chování. Měření tlaku probíhalo pouze v zesilovači pomocí manometru, protože potřebné součásti pro připojení čidla nebyly včas objednány a doručeny.

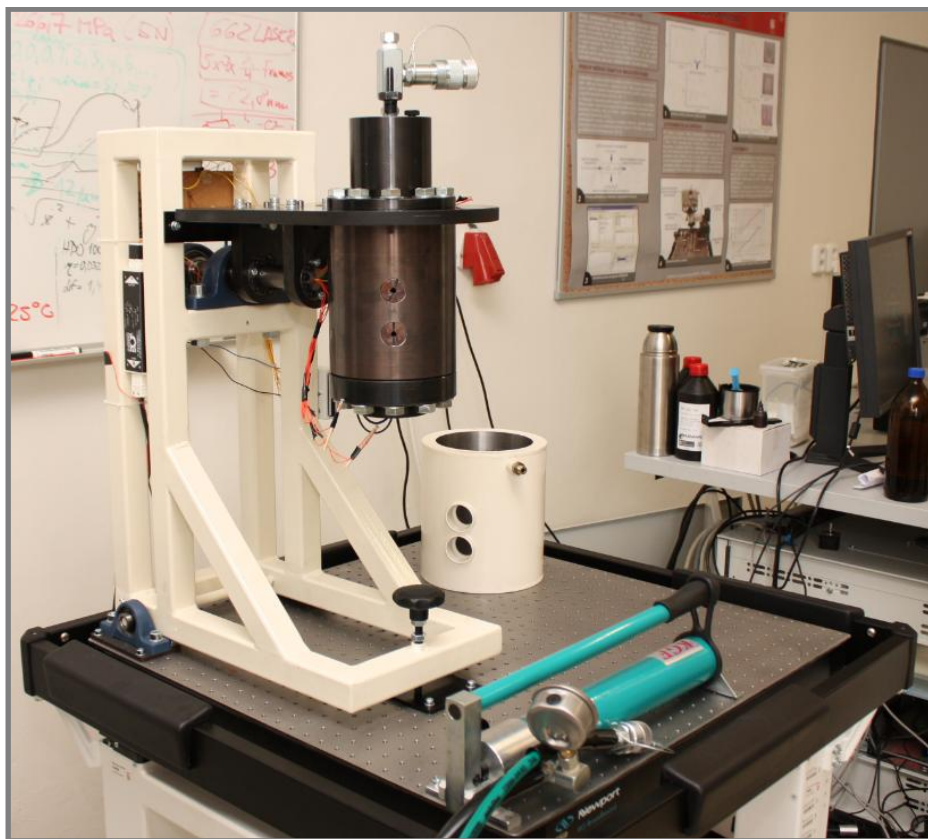
Před odevzdáním textu diplomové práce bylo celé zařízení sestaveno, ale optimalizace vysokotlakých těsnění vnitřních prostor viskozimetru je časově náročná a bude probíhat v době po odevzdání diplomové práce.



Obr. 4-27 Vysokotlaký viskozimetr – základní poloha



Obr. 4-28 Vysokotlaký viskozimetr – elektrické obvody



Obr. 4-29 Vysokotlaký viskozimetr – obrácená poloha



Obr. 4-30 Vysokotlaký viskozimetr – pohled do pozorovacího okna

5 DISKUZE

Zkonstruovaný vysokotlaký viskozimetr se od obdobných zařízení odlišuje současným měřením viskozity, hustoty a optickým pozorováním krystalizace kapaliny. Viskozimetr i zesilovač mají společnou vertikální osu, čímž se zařízení odlišuje od jiných viskozimetrů využívajících ruční hydraulické pumpy. Originální je způsob odvodu vzduchu a utěsnění vnitřního prostoru viskozimetru pomocí kuličky. Tímto způsobem je zajištěno, že ve vnitřním prostoru zařízení nebude vzduch.

Hydraulická ruční pumpa a zesilovač tlaku fungují a nebyl zaznamenán žádný problém s těsností. Přívodní vysokotlaká hadice je dostatečně dlouhá, aby se nemusela sundávat při otočení viskozimetru.

Po smontování zařízení se objevil problém s malou silou působící na těsnicí kuličku pomocí přilepeného vlasce. Tímto způsobem není možné vyvolat dostatečný tlak, aby těsnění začalo plnit svou funkci. Do kuličky bude nutné vyhloubit neprůchozí otvor, ve kterém bude upevněno ocelové lanko. Možnost aplikace vyšší síly umožní utěsnění viskozimetru a natlakování celého zařízení. Ostatní těsnění mohla být z tohoto důvodu vystavena pouze minimálnímu tlaku. Problém s těsněním se objevil u pozorovacích oken, kde použité o-kroužky musely být nahrazeny silnějšími. Při demontáži pozorovacích oken a víka mohou zůstat těsnicí kroužky v tlakové nádobě. Pro rychlejší výměnu pozorované kapaliny je vhodné zajistit, aby se kroužky vyjmuly z válce spolu s čepem.

Otočné části viskozimetru jsou dobře vyváženy a otáčení viskozimetrem je velmi snadné. Z hlediska montáže je způsob zajištění polohy šroubem dostatečný, ale pro měření by byla výhodná možnost přesného nastavení polohy. Na hřídel by mohla být nainstalována brza, které umožní fixaci viskozimetru v libovolné poloze.

V zařízení se nacházejí dvě optické závory pro měření rychlosti propadávajícího tělíska. Intenzita světla procházejícího viskozimetrem není dostatečná, aby stačila na rozsvícení LED diod, ale je dostačující pro software. Funkce optických závor byla vyzkoušena volným pádem kuličky viskozimetrem. Takto změřená rychlost je vyšší než odpovídá měření s kapalinou. Vyhodnocovací program přesto neměl problém se změřením rychlosti tělíska.

Teplotní čidla jsou tvořena dvěma termočlánky a pro svou správnou funkci potřebují referenční teplotu (0 °C) a termočlánekový zesilovač. Měření teploty probíhá s přesností na desetiny stupně. Pro snadnější zkalibrování čidel a obsluhu zařízení bude nutné prodloužit kompenzační vedení jednotlivých termočlánků.

Základní elektronická deska funguje správně. Po celkovém odladění zařízení by bylo v budoucnu vhodné tuto provizorní elektronickou desku nahradit tištěným obvodem pro lepší vzhled, bezpečnost a funkčnost.

Při konečné úpravě textu diplomové práce si autor uvědomil chybu ve výkresové dokumentaci. Zesilovač (č. v. X1-03C005) byl vyroben z oceli 11 700 podle ČSN namísto zušlechtnuté oceli 16 341. Bezpečnost zesilovače z daného materiálu je 1,79 vůči mezi pevnosti a 1 vůči mezi kluzu při zatížení tlakem o velikosti 60 MPa. Tato

chyba neovlivňuje bezpečnost uživatele. Pokud by byla překročena mez kluzu (teoreticky maximální tlak v zesilovači je pouze 52 MPa), dojde k úniku hydraulické kapaliny vlivem zvětšení vnitřního průměru zesilovače. V případě výrazné deformace zesilovače bude nutná jeho opětovná výroba z původně navrženého materiálu.

V průběhu montáže a ověřování funkce nebyly nalezeny další technické ani softwarové nedostatky. Plné zprovoznění zařízení bude vyžadovat delší odladění postupů a pravděpodobně i parametrů těsnění. Přesná kalibrace zařízení může být provedena až po několikátém natlakování zařízení. Při prvních testech vysokého tlaku může docházet k mírným plastickým deformacím součástí a tím ke změně kalibrační konstanty. Vyhodnocovací software umožňuje více kalibrací stejného tělíska a je možné sledovat změnu kalibrační konstanty v čase. Zařízení může být používáno pro měření, až tato změna bude minimální.

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo sestavit zařízení pro měření viskozity za extrémně vysokých tlaků v dostatečně širokém rozsahu teplot. V průběhu řešení byla objevena nutnost současného měření hustoty s viskozitou. Zařízení dále umožňuje optické pozorování krystalizace kapaliny. Měření mohou být prováděna při libovolném tlaku a teplotě. Primárním propadávajícím tělískem je kulička, ale konstrukce umožňuje i použití válcového tělíska. Při jeho použití klesá rychlost měření, ale roste jejich přesnost a otevírá se možnost měření závislosti viskozity na smykovém napětí.

Velká část konstrukce vychází ze zařízení popsanych v literatuře. Výsledný viskozimetr je navzdory tomu originálem, ve kterém jsou aplikovány autorovy vlastní nápady. Zařízení bude umožňovat měření za maximálního tlaku 1,5 GPa v rozsahu teplot -30 až 120 °C. Z hlediska parametrů měření, zejména maximálního tlaku a možnosti optického pozorování krystalizace kapaliny, se jedná o unikátní zařízení v celosvětovém měřítku, které bylo navrženo s důrazem na jeho bezpečný provoz.

V rámci řešení diplomové práce byly vytvořeny elektrické obvody pro obsluhu jednotlivých senzorů a elektrických zařízení nutných pro funkci viskozimetru. Dále byl vytvořen rozsáhlý program umožňující kromě samotného měření viskozity a hustoty i kalibraci teploty, tlaku a propadávajících tělísek. Vytvořený program zásadním způsobem minimalizuje práci uživatele při měření a vyhodnocování výsledků měření.

Před odevzdáním textu diplomové práce nebyla provedena kalibrace a ověřovací měření z důvodu nedostatku času. Funkčnost zařízení byla ověřena pouze za atmosférického tlaku. Po odladění měřících postupů a těsnění bude zařízení schopno plnit požadavky na něj kladené. Realizovaný vysokotlaký viskozimetr poskytne informace o chování kapalin v podmínkách, při kterých víme o chování kapalin pouze velmi málo. Dále zařízení poskytne přesné vstupy do výpočtů tření a tloušťky mazacího filmu v podmínkách EHD mazání.

BIBLIOGRAFIE

- [1] BOYES, W. *Instrumentation reference book*. Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier, c2010. ISBN 07-506-8308-2.
- [2] HAMROCK, B. J.; SCHMIDT, S. R.; JACOBSON, B. O. *Fundamentals of fluid film lubrication*. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 08-247-5371-2.
- [3] BAIR, S. A Routine High-Pressure Viscometer for Accurate Measurements to 1 GPa. *Tribology Transactions*. roč. 47, č. 3, s. 356-360. ISSN 1040-2004. DOI: 10.1080/05698190490455582.
- [4] ALEXANDER, Y. M. *Rheology: concepts, methods, and applications*. Toronto: ChemTec Pub, 2005. ISBN 978-189-5198-331.
- [5] BAIR, S. Pressure-Viscosity Behavior of Lubricants to 1.4 GPa and Its Relation to EHD Traction. *Tribology Transactions*. 2000, vol. 43, issue 1, s. 91-99. DOI: 10.1080/10402000008982317.
- [6] BAIR, S. *High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics*. 1st. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 04-445-2243-3.
- [7] JACOBSON, B. O. *Rheology and elastohydrodynamic lubrication*. New York: Elsevier, 1991. ISBN 04-448-8146-8.
- [8] BRIDGMAN, P. W. *The physics of high pressure*. New York: Dover Publications, 1970. ISBN 04-866-2712-8.
- [9] BRIDGMAN, P. W.: *The Effect of Pressure on the Viscosity of Forty-Three Pure Liquids*. Proc. Amer. Acad., Vol. 61, 1926, s. 57-99.
- [10] BARUS, C. Isotherms, Isopiestic, and Isometrics relative to Viscosity. *American Journal of Science*, 45, 1893, s.87-96.
- [11] ROELANDS, C. J. A.: *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*, Druk, V.R.B. Groingen, Netherlands, 1966.
- [12] SORAB, J; VANARSDALE, W. E. A Correlation for the Pressure and Temperature Dependence of Viscosity. *Tribology Transactions*. 1991, vol. 34, issue 4, s. 604-610. DOI: 10.1080/10402009108982077.
- [13] OHNO, N.; FUKUDA, R.; MORI, H.; MAWATARI, T.; MIA, S. *High pressure rheology of Environmentally Friendly Vegetable Oils*. Saga, 2012.
- [14] DOWSON, D.; HIGGINSON, G. R.; WHITAKER, A. V. Elastohydrodynamic Lubrication: A Survey of Isothermal Solutions. *Journal Mechanical Engineering Science*, 4, 1962, s. 121-162.

- [15] JACOBSON, B. O.; VINET, P. A Model for the Influence of Pressure on the Bulk Modulus and the Influence of Temperature on the Solidification Pressure for Liquid Lubricants. *Journal of Tribology*. 1987, vol. 109, issue 4, s. 709-713. DOI: 10.1115/1.3261542.
- [16] IRVING, J. B.; BARLOW, A. J. An automatic high pressure viscometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1971, vol. 4, issue 3, s. 232-236. DOI: 10.1088/0022-3735/4/3/017.
- [17] CHAN, R. K. Y.; JACKSON, D. A. An automated falling-cylinder high pressure laser-Doppler viscometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1985, vol. 18, issue 6, s. 510-515. DOI: 10.1088/0022-3735/18/6/011.
- [18] MCLACHLAN, R. J. A new high pressure viscometer for viscosity range 10 to 10⁶ Pa s. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1976, vol. 9, issue 5, s. 391-394. DOI: 10.1088/0022-3735/9/5/020.
- [19] DANDRIDGE, A.; JACKSON, D. A. Measurements of viscosity under pressure: a new method. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1981, vol. 14, issue 5, s. 829-831. DOI: 10.1088/0022-3727/14/5/012.
- [20] IRVING, J. B. The effect of nonvertical alignment on the performance of a falling-cylinder viscometer. *Journal of Physics D: Applied Physics*. vol. 5, issue 1, s. 214-224. DOI: 10.1088/0022-3727/5/1/330.
- [21] BAIR, S.; QURESHI, F. The high pressure rheology of polymer-oil solutions. *Tribology International*. 2003, vol. 36, issue 8, s. 637-645. DOI: 10.1016/S0301-679X(03)00008-2.
- [22] PATON, J.M.; SCHASCHKE, C.J. Viscosity measurement of biodiesel at high pressure with a falling sinker viscometer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2009, vol. 87, issue 11, s. 1520-1526. DOI: 10.1016/j.cherd.2009.04.007.
- [23] SCHASCHKE, C.J.; ABID, S.; FLETCHER, I.; HESLOP, M.J. Evaluation of a falling sinker-type viscometer at high pressure using edible oil. *Journal of Food Engineering*. 2008, vol. 87, issue 1, s. 51-58. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.09.032.
- [24] CRISTESCU, N. D.; CONRAD, B. P.; TRAN-SON-TAY, R. A closed form solution for falling cylinder viscometers. *International Journal of Engineering Science*. 2002, vol. 40, issue 6, s. 605-620. DOI: 10.1016/S0020-7225(01)00094-5.
- [25] MIA, S.; MIZUKAMI, S.; FUKUDA, R.; MORITA, S.; OHNO, N. High-pressure behavior and tribological properties of wind turbine gear oil. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, vol. 24, issue 1. DOI: 10.1007/s12206-009-1179-5.

- [26] MACOSKO, Ch. W. *Rheology: principles, measurements, and applications*. New York: Wiley-VCH, 1994. ISBN 04-711-8575-2.
- [27] Comings, E. W. *High pressure technology*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1956).
- [28] EREMETS, M. *High pressure experimental methods*. New York: Oxford University, 1996. ISBN 01-985-6269-1.
- [29] SHERMAN, W a A STADTMULLER. *Experimental techniques in high-pressure research*. New York: Wiley, 1987. ISBN 04-711-0313-6.
- [30] Omega - Termočlánky. [online]. [cit. 2013-05-10].
Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/temperature/Z/pdf/z207.pdf>
- [31] Buderus Steel. [online]. [cit. 2013-05-10].
Dostupné z: [http://www.buderus-steel.com/english/files/2379_ISO_B\(2\).pdf](http://www.buderus-steel.com/english/files/2379_ISO_B(2).pdf)
- [32] Sittech - Těsnění. [online]. [cit. 2013-05-10].
Dostupné z: <http://www.sittech.cz/okrouzky.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	zrychlení propadávajícího tělíska
A_1, \dots	-	konstanty charakterizující danou kapalinu
A_s	mm^2	obsah průřezu šroubu
B_0	-	bezrozměrná konstanta kapaliny
C	-	kalibrační konstanta viskozimetru
d_2	mm	střední průměr závitu šroubu
d_3	mm	malý průměr závitu šroubu
D_1	mm	průměr pístu ve viskozimetru
D_2	m	průměr pístu v zesilovači
E_k	J	maximální energie akumulovaná v kapalině
E	GPa	Youngův modul
E_1	GPa	Youngův modul karbidu wolframu CTU17R
E_2	GPa	Youngův modul oceli 19 573.6
F_1	N	síla vyvolaná kapalinou působící na uzávěr tlakové nádoby
F_g	N	gravitační síla
F_o	N	odporová síla
F_{vz}	N	vztlačková síla
F_τ	N	smyková síla
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
I_1	A	proud procházející LED diodou
I_2	A	proud procházející žárovkami
I_3	A	proud procházející elektromagnetem
K	-	substituce v pohybové rovnici propadávajícího tělíska
l	m	délka vodiče tvořícího vinutí elektromagnetu
L	mm	vzdálenost mezi optickými závorami
L_m	mm	délka matice
L_p	mm	zdvih pístu
L_t	mm	délka válcového propadávajícího tělíska
M	-	substituce v pohybové rovnici propadávajícího tělíska
m	kg	hmotnost tělíska
n	-	počet šroubů
p	Pa	provozní tlak
p_0	Pa	atmosférický tlak
p_1	MPa	tlak na vnitřním povrchu válce
p_2	MPa	tlak na vnějším povrchu válce
p_s	MPa	tlak v závitech metrického šroubu
p_z	MPa	tlak působící na čelech válce
P_1	MPa	požadovaný tlak ve viskozimetru
P_{12+}	MPa	kontaktní tlak působící na 1. rozhraní při teplotě 120 °C
P_2	MPa	tlak na 1. rozhraní válců po aplikaci tlaku P_1
P_{21}	MPa	kontaktní tlak mezi 2. a 1. válcem po lisování
P_{21-}	MPa	kontaktní tlak působící na 1. rozhraní při teplotě -30 °C
P_{22}	MPa	dodatečný tlak mezi 2. a 1. válcem po aplikaci tlaku P_1
P_3	MPa	tlak na 2. rozhraní válců po aplikaci tlaku P_1
P_{31}	MPa	kontaktní tlak mezi 3. a 2. válcem po lisování
P_{32}	MPa	dodatečný tlak mezi 3. a 2. válcem po lisování 1. válce

P_{33}	MPa	dodatečný tlak mezi 3. a 2. válcem po aplikaci tlaku P_1
P_4	MPa	tlak na 3. rozhraní válců po aplikaci tlaku P_1
P_{41}	MPa	kontaktní tlak mezi 4. a 3. válcem po lisování
P_{42}	MPa	dodatečný tlak mezi 4. a 3. válcem po lisování 2. válce
P_{43}	MPa	dodatečný tlak mezi 4. a 3. válcem po lisování 1. válce
P_{44}	MPa	dodatečný tlak mezi 4. a 3. válcem po aplikaci tlaku P_1
P_5	MPa	tlak na působící na vnější povrch vysokotlakého válce
P_{R1}	MPa	výkon rezistoru u LED diody
P_{R2}	MPa	výkon rezistoru u žárovek
P_{R3}	MPa	výkon rezistoru u elektromagnetu
P_{R4}	MPa	výkon rezistoru u elektromagnetu
P_r	bar	tlak vyvolaný rázovou vlnou
P_S	mm	rozteč závitu metrického šroubu
P_z	MPa	tlak v zesilovači
P_Z	W	požadovaný výkon žárovky
r	m	obecná radiální vzdálenost
r_1	mm	vnitřní poloměr obecného válce
r_{11}	mm	vnitřní poloměr 1. válce před nalisováním
r_{12}	mm	vnější poloměr 1. válce před nalisováním
r_2	mm	vnější poloměr obecného válce
r_{22}	mm	vnitřní poloměr 2. válce před nalisováním
r_{23}	mm	vnější poloměr 2. válce před nalisováním
r_{33}	mm	vnitřní poloměr 3. válce před nalisováním
r_{34}	mm	vnější poloměr 3. válce před nalisováním
r_{44}	mm	vnitřní poloměr 4. válce před nalisováním
r_{45}	mm	vnější poloměr 4. válce před nalisováním
rr_2	mm	poloměr vysokotlakého válce na rozhraní mezi 1. a 2. válcem
rr_3	mm	poloměr vysokotlakého válce na rozhraní mezi 2. a 3. válcem
rr_4	mm	poloměr vysokotlakého válce na rozhraní mezi 3. a 4. válcem
R_1	mm	poloměr vnitřního otvoru propadávajícího válce
R_2	mm	vnější poloměr propadávajícího válce
R_3	mm	vnitřní průměr nádoby
$\overline{R_1}$	Ω	odpor rezistoru u LED diody
$\overline{R_2}$	Ω	odpor rezistoru u žárovek
$\overline{R_3}$	Ω	odpor rezistoru u elektromagnetu
$\overline{R_4}$	Ω	odpor rezistoru u elektromagnetu
R_{elm}	Ω	odpor vinutí elektromagnetu
R_{vzd}	m	bezpečná vzdálenost z hlediska zasažení tlakovou vlnou
R_s	mm	průměr propadávající koule
s	m	poloha tělíska
S	mm ²	plošný obsah průřezu vodiče
S_1	mm ²	plošný obsah pístu viskozimetru
t	s	čas, za který tělísko urazí danou vzdálenost.
t_1	s	okamžik odkrytí první fotodiody
t_2	s	okamžik zakrytí druhé fotodiody
T_0	K	pokořová teplota
T_{max}	K	maximální teplota ve viskozimetru (120 °C)

T_{\min}	K	minimální teplota ve viskozimetru (-30 °C)
u	mm	obecný radiální posuv
u_{12}	mm	posuv vnějšího povrchu 1. válce při lisování na poloměru rr_2
u_2	mm	přesah mezi 1. a 2. válcem
u_{22}	mm	posuv vnitřního povrchu 2. válce při lisování na poloměru rr_3
u_{23}	mm	posuv vnějšího povrchu 2. válce při lisování na poloměru rr_3
u_3	mm	přesah mezi 2. a 3. válcem
u_{33}	mm	posuv vnitřního povrchu 3. válce při lisování na poloměru rr_4
u_{34}	mm	posuv vnějšího povrchu 3. válce při lisování na poloměru rr_4
u_4	mm	přesah mezi 3. a 4. válcem
u_{44}	mm	posuv vnitřního povrchu 4. válce při lisování na poloměru rr_4
u_{1rr2}	mm	posuv 1. válce na 1. rozhraní vlivem tlaku P_1
u_{1rr3}	mm	posuv středního rozhraní nalisováním 1. válce
u_{1rr4}	mm	posuv vnějšího rozhraní nalisováním 2. válce
u_{2k}	mm	změna poloměru 1. válce po vložení do tekutého dusíku
u_{2rr2}	mm	posuv 2. válce 1. rozhraní vlivem tlaku P_1
u_{2rr3}	mm	posuv 2. rozhraní vlivem tlaku P_1
u_{2rr4}	mm	posuv vnějšího rozhraní nalisováním 1. válce
u_{3rr4}	mm	posuv 3. rozhraní vlivem tlaku P_1
U	V	výstupní napětí stejnosměrného zdroje
U_{LED}	V	požadované napětí na LED diodě
U_Z	V	požadované napětí na žárovce
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost tělíska
v_1	$m \cdot s^{-1}$	rychlost kapaliny proudící mezi tělískem a trubicí
v_2	$m \cdot s^{-1}$	rychlost kapaliny proudící axiálním otvorem tělíska
V_{stl}	mm^3	stlačitelný objem kapaliny
w	mm	obecný axiální posuv
z	mm	obecná axiální vzdálenost
Z	-	bezrozměrný viskózně-tlakový index
α'	GPa^{-1}	tlakově-viskózní koeficient
α	-	součinitel koncentrace napětí
α_k	K^{-1}	teplotní délková roztažnost karbidu,
α_o	K^{-1}	teplotní délková roztažnost oceli
γ	s^{-1}	gradient smykové rychlosti (smykový spád)
$\delta p / \delta z$	$Pa \cdot m^{-1}$	gradient tlaku podél vertikální osy tělíska
ΔT_2	K	minimální teplota ocelových válců pro poslední lisování
ΔT_3	K	minimální rozdíl teplot pro 2. lisování
ΔT_4	K	minimální rozdíl teplot pro 1. lisování
Δu_-	mm	změna přesahu na 1. rozhraní v důsledku ochlazení
Δu_+	mm	změna přesahu na 1. rozhraní v důsledku ohřátí
ΔP_{21-}	MPa	dodatečný kontaktní tlak vlivem nízké teploty
ΔP_{21+}	MPa	dodatečný kontaktní tlak vlivem vysoké teploty
ΔV	mm^3	maximální možná změna objemu kapaliny ve viskozimetru
η	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
η_0	$Pa \cdot s$	viskozita kapaliny za atmosférického tlaku
η'	-	bezrozměrná konstanta kapaliny
μ	-	Poissonova konstanta

μ_1	-	Poissonova konstanta karbidu wolframu
μ_2	-	Poissonova konstanta oceli
ρ_0	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota kapaliny za atmosférického tlaku
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	obecná hustota kapaliny
ρ_1	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota propadávajícího tělíska
ρ_2	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota kapaliny ve viskozimetru
ρ_m	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	měrný elektrický odpor měděného vodiče
σ_{red}	MPa	reduované napětí
σ_r	MPa	radiální napětí
σ_t	MPa	obvodové napětí
σ_z	MPa	axiální napětí
σ	MPa	napětí v tahu
σ_T	MPa	napětí v tlaku
τ	MPa	tečné (smykové) napětí v kapalině
3D		třírozměrný
EHD		elastohydrodynamický
HD		hydrodynamický
MKP		metoda konečných prvků

SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

Seznam obrázků a grafů

Obr. 0-1	Viskozita minerálního oleje v závislosti na tlaku a přítomnosti polymerů	13
Obr. 1-1	Definice newtonovské a neneutronovské kapaliny	14
Obr. 1-2	Ukázka aproximace dle Sorab a Vanarsdale	15
Obr. 1-3	Padající koule	16
Obr. 1-4	Přehled některých typů viskozimetrů	17
Obr. 1-5	Propadávající válec s axiálním otvorem	18
Obr. 1-6	Vysokotlaký viskozimetr, P. W. Bridgman, Irving a Barlow	20
Obr. 1-7	Vysokotlaký viskozimetr, autor: Scott Bair	21
Obr. 1-8	Vysokotlaký viskozimetr, autor: Nobuyshi Ohno	22
Obr. 3-1	Princip funkce optických závor	27
Obr. 3-2	Silnostěnný válec zatížený tlakem na vnitřním povrchu	28
Obr. 3-3	Proces autofritáže	29
Obr. 3-4	Základní typy těsnění	31
Obr. 3-5	Způsob těsnění čepů, ocelový kroužek nemusí být použit	31
Obr. 3-6	Možnosti statického těsnění, materiály mohou být kombinovány	32
Obr. 3-7	Základní možnosti těsnění safírových skel	32
Obr. 3-8	Varianta 1: Kolmé uspořádání s oddělovacím pístem	34
Obr. 3-9	Varianta 2: Kolmé uspořádání bez oddělovacího pístu	34
Obr. 3-10	Varianta 3: Koaxiální uspořádání těsné	35
Obr. 4-1	Zatížené obecné válcové těleso	36
Obr. 4-2	Optimální konstrukční řešení vysokotlakového viskozimetru	37
Obr. 4-3	Princip měření rychlosti pro válcové tělísko	39
Obr. 4-4	Znázornění pohybových rovnic válcového propadávajícího tělíska	40
Obr. 4-5	Vysokotlaký válec	42
Obr. 4-6	Zobrazení rozměrů válce pro výpočty bezpečnosti	43
Obr. 4-7	Kontaktní tlaky při lisování válců	44
Obr. 4-8	Grafické vyjádření jednotlivých složek napětí na válci bez zatížení	47
Obr. 4-9	Grafické vyjádření jednotlivých složek napětí na válci po zatížení	49
Obr. 4-10	Závislost maximálního tlaku ve viskozimetru na teplotě	53
Obr. 4-11	Schéma zapojení termočlánku	54
Obr. 4-12	Hydraulický zesilovač tlaku	56
Obr. 4-13	Průřez koncem pístu zesilovače	57
Obr. 4-14	MKP analýza zesilovače	58
Obr. 4-15	Průřez víkem viskozimetru	59
Obr. 4-16	MKP analýza karbidového čepu víka	61
Obr. 4-17	Průřez vysokotlakým těsněním	61
Obr. 4-18	Průřez pozorovacím oknem	62
Obr. 4-19	MKP analýza karbidového čepu okna	63
Obr. 4-20	MKP analýza závitového čepu okna	63
Obr. 4-21	3D model zařízení	65
Obr. 4-22	3D model uchycení základní desky a hřídele	66
Obr. 4-23	Průřez 3D modelem temperačního válce	67
Obr. 4-24	Schéma měřicího řetězce	69

Obr. 4-25	Schéma zapojení obvodů	70
Obr. 4-26	Ukázka uživatelského rozhraní části programu pro měření viskozity	73
Obr. 4-27	Vysokotlaký viskozimetr – základní poloha	75
Obr. 4-28	Vysokotlaký viskozimetr – elektrické obvody	75
Obr. 4-29	Vysokotlaký viskozimetr – obrácená poloha	76
Obr. 4-30	Vysokotlaký viskozimetr – pohled do pozorovacího okna	76

Seznam tabulek

Tab. 1-1	Parametry vysokotlakých pádových viskozimetrů	20
Tab. 4-1	Jednotlivé složky napětí ve válcích po nalisování	46
Tab. 4-2	Jednotlivé složky napětí ve válcích po zatížení	49
Tab. 4-3	Celkové náklady na zařízení	73

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1:** Popis programu
Příloha 2: Materiálový list karbidu
Příloha 3: Zkoušky mechanických vlastností oceli
Příloha 4: Manuál k hydraulické pumpě
Příloha 5: Vybrané nabídky a objednávky
- Příloha 6:** Kompletní výkresová dokumentace (samostatná příloha a .pdf)
Příloha 7: Výpočet válce (.m script)
Příloha 8: Výpočet propadávajícího tělíska (.m script)
Příloha 9: Software pro Matlab (.rar)
Příloha 10: Software spustitelná aplikace 64-bit (.rar)
- Příloha 11:** CD s diplomovou prací včetně příloh

Seznam výkresů

X1A	VISKOZIMETR	X1-007B	KOSTRA
X1-01B	SLOŽENÝ VÁLEC	X1-007E01	JEKL
X1-01_C	SLOŽENÝ VÁLEC	X1-007E02	JEKL
X1-01_B	VÁLEC – OBRÁBĚNÍ	X1-007E03	JEKL
X1-01D001	POUZDRO	X1-007E04	JEKL
X1-01C004	VÁLEC	X1-007E05	JEKL
X1-02D001	POUZDRO	X1-007E06	JEKL
X1-02C002	VÍKO	X1-007E07	JEKL
X1-02E003	ZÁTKA	X1-007E08	ČEP
X1-02D004	VLOŽKA	X1-008C	TEMPERAČNÍ VÁLEC
X1-03D001	POUZDRO	X1-008E01	VNITŘNÍ VÁLEC
X1-03E002	TERČ	X1-008D02	VNĚJŠÍ VÁLEC
X1-03E003	ČEP	X1-008E03	VÍKO
X1-03E004	POUZDRO	X1-008E04	TRUBKA
X1-03C005	ZESILOVAČ	X1-008E05	TRUBKA
X1-03E006	PÍST	X1-009E02	PODLOŽKA
X1-04D001	POUZDRO	X1-10E001	DRŽÁK
X1-04D002	ČEP	X1-10E002	KRYT
X1-04D003	ČEP	X1-10E003	TERČ
X1-05E001	TĚSNICÍ KROUŽEK	X1-10E004	MADLO
X1-05E002	TĚSNICÍ KROUŽEK	X1-10E005	JÁDRO
X1-05E003	POJISTNÝ KROUŽEK	X1-10E006	HŘÍDEL
X1-05E004	POJISTNÝ KROUŽEK	X1-10E008	PŘÍLOŽKA
X1-06C001	DESKA	X1-10E009	VLOŽKA
X1-06E002	DOMEK		

PŘÍLOHA 1: POPIS PROGRAMU

Obecné informace, pracovní složka, potřebné soubory, spuštění programu, první přihlášení

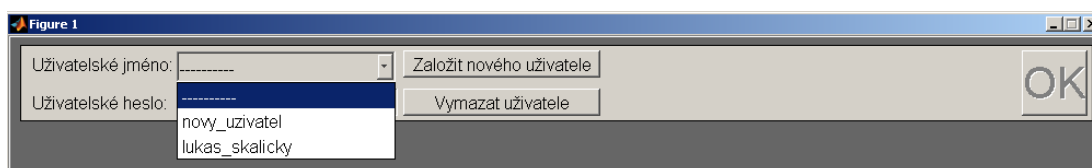
Program je vytvořen metodou *Switched Board Programing* kombinovanou se *Session Based Interface*. Pro jeho plnou funkci musí být na počítači k dispozici Matlab verze alespoň 2011b. Dále musejí být nainstalované knihovny Data Acquisition Toolbox a Symbolic Math Toolbox. Pro plné využití funkcí programu je navíc potřeba Statistics Toolbox a Curve Fitting Toolbox. Na přiloženém CD je spustitelná aplikace pro 64-bit operační systém. Většina částí programu potřebuje pro svou funkci měřicí kartu od *Nacional Instruments* (NI USB 6008/6009). V počítači musejí být nainstalovány ovladače pro příslušnou měřicí kartu.

Je výhodné, aby měl samotný program svou pracovní složku. V této složce musí být umístěn hlavní soubor programu *vysokotlaky_viskozimetr.m*. Dále se zde musejí nalézat datové soubory s názvy *seznam_uzivatelu*, *kalibrace teploty*, *kalibrace tlaku* a *seznam kalibraci*. Do této složky se ukládají cesty k jednotlivým uživatelským složkám a kalibrace jednotlivých propadávajících tělísek. Matlab musí mít tuto složku nastavenou jako aktuální, respektive se musí program spouštět z této složky (je-li spouštěna samostatně spustitelná aplikace).

V průběhu používání programu se budou v této složce vytvářet různé další soubory. Pro správnou funkci programu se nesmí se soubory nijak manipulovat. Cesta k pracovní složce nesmí obsahovat mezery ani interpunkci.

Samotný program se spouští napsáním *vysokotlaky_viskozimetr* do pracovní řádky Matlabu. Pokud není Matlab k dispozici (nebo jeho plná verze), musí se nainstalovat *Matlab Compiler* (k dispozici na přiloženém CD). Po jeho nainstalování a rozbalení spustitelné aplikace se objeví příslušný soubor .exe.

Po spuštění se zobrazí úvodní obrazovka, která slouží pro přihlašování a vytváření nových uživatelů (viz obr. 1, 2)

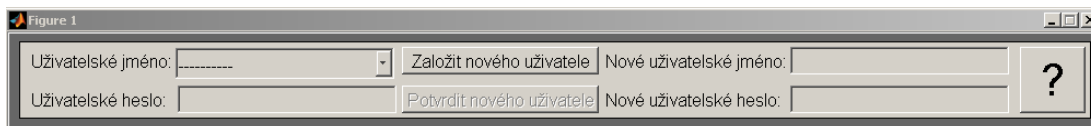


Obr. 1 Úvodní obrazovka

Uživatele lze vybrat z rozbalovacího seznamu. Uživatelské heslo je tvořeno alespoň třemi znaky bez mezer a interpunkce. Po zvolení uživatele, napsání správného hesla a stisknutí tlačítka OK se zobrazí další nabídka.

Stisknutím tlačítka *Založit nového uživatele* se objeví nabídka (obr. 2) pro vepsání nového uživatelského jména a hesla. Pokud text obsahuje mezeru, program ji sám nahradí podtržítkem. Interpunkci program opravit nedokáže. Její použití by způsobilo

značné problémy. Po stisknutí tlačítka ? se zobrazí pokyny pro vytvoření uživatelské složky. Její umístění je libovolné. Pokud se později změní cesta ke složce, program bude vyžadovat zadání nové cesty. Cesta k uživatelské složce také nesmí obsahovat mezery a interpunkci. Nejvýhodnější je vytvořit složku přímo v pracovním adresáři (ale není to podmínkou).



Obr. 2 Založení nového uživatele

Uživatelské heslo slouží pouze jako jednoduchá ochrana před neúmyslným provedením nenapravitelných změn v cizích měřeních. V případě zapomenutí hesla je uloženo v uživatelské složce v souboru *nastaveni_2*. Do uživatelské složky se také ukládají soubory měření a jejich zálohy.

Při odstranění uživatele dojde k jeho odstranění ze seznamu uživatelů, přepsání cest k uživatelským složkám a odstranění uživatele ze záznamů kalibrací teploty, tlaku a tělísek. Program se zeptá a případně i pokusí o odstranění uživatelské složky.

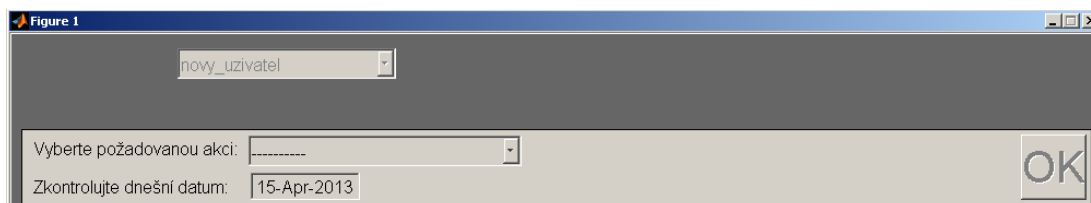
Nastavitelné parametry

Při výpočtech i jiných akcích je využíváno velké množství parametrů zařízení. Pokud by někdy došlo ke změně parametrů, mohou být opraveny přímo ve zdrojovém kódu programu. Zdrojový kód může být upravován přímo v Matlabu po napsání *edit vysokotlaky_viskozimetr*. Parametry se nacházejí ve zdrojovém kódu zcela dole (přibližně od řádku č. 6 000). Uživatelské parametry mají tvar funkce, kterou si hlavní program zavolá, když potřebuje daný parametr. Parametry se týkají zejména materiálových a geometrických charakteristik válce a parametrů měřicí karty. Zde je uveden popis několika nejdůležitějších parametrů pro běžného uživatele:

- Hranice osv: Udává hraniční hodnotu napětí ve voltech na daném vstupu měřicí karty. Pokud je napětí nad danou hranicí, program vyhodnotí, že osvětlení je zapnuto.
- Hranice elm: Identická funkce jako u osvětlení. Tato se týká elektromagnetu.
- Vzorkovací frekvence: Udává frekvenci snímání napěťových vstupů měřicí kartou.

Výběr akce

Po stisknutí tlačítka OK nebo po založení nového uživatele se objeví nová nabídka (obr. 3).

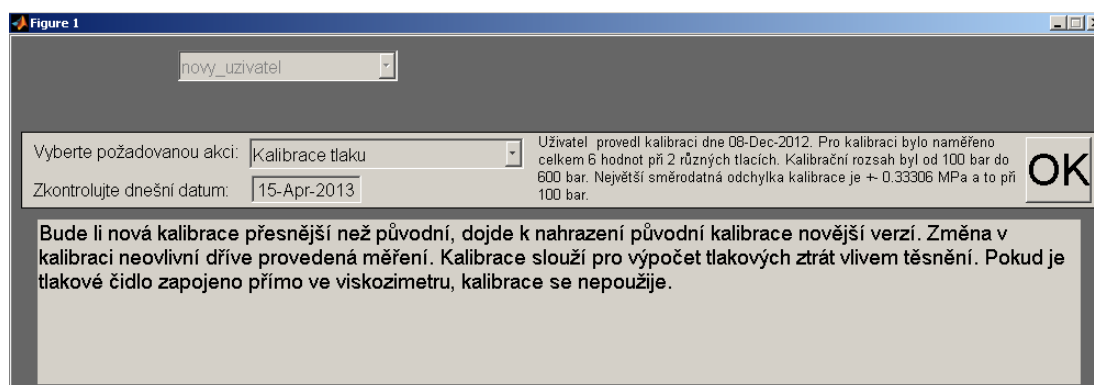


Obr. 3 Výběr akce

V této nabídce by měl uživatel nejprve zkontrolovat a případně přepsat aktuální datum. Poté si může vybrat jednu z celkem devíti možných akcí. Dále se nacházejí popisy jednotlivých akcí. Pořadí popisu je odlišné od pořadí akcí v rozbalovacím seznamu. Pro všechny akce, vyjma *Exportu*, je nutné připojení měřicí karty před stisknutím tlačítka OK.

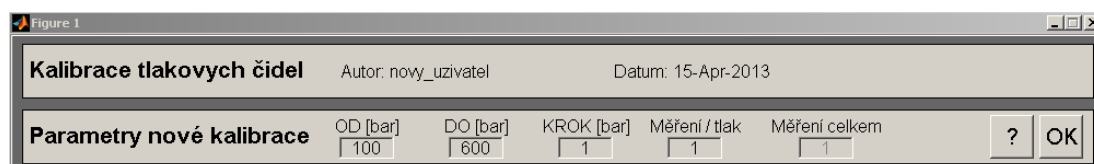
Kalibrace tlaku

Kalibraci tlaku je nutné provést, protože při většině měření je tlakové čidlo umístěno v zesilovači. Při vybrání možnosti *Kalibrace tlaku* se objeví informace o předchozí kalibraci (obr. 4).



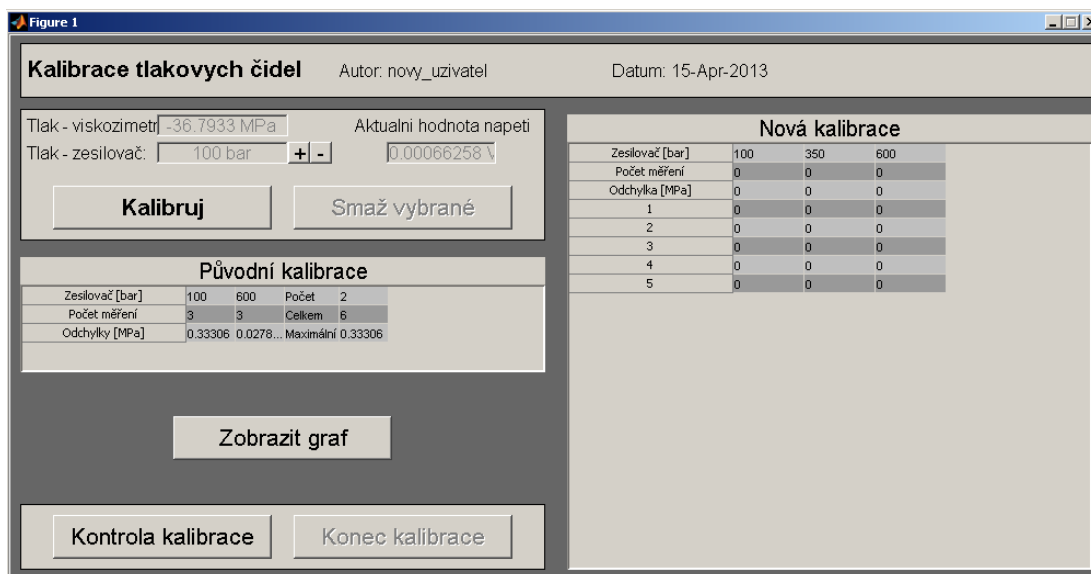
Obr. 4 Výběr akce - Kalibrace tlaku

Po stisknutí tlačítka OK se Matlab pokusí o připojení k měřicí kartě. Nejprve program nalezne připojená externí zařízení a uživatel je vyzván k výběru. Při následném úspěšném připojení se zobrazí uživatelské prostředí pro kalibraci tlaku (obr. 5).



Obr. 5 Kalibrace tlaku - nastavení parametrů kalibrace

Uživatel musí nejprve nastavit plánované parametry kalibrace. Tlak je udáván v barech, protože stupnice manometru na ruční pumpě je rovněž udávána v barech. Minimální hodnota tlaku (OD) je 10 bar, maximální hodnota (DO) je 600 bar. Okrajové hodnoty i velikost kroku hlídá program. Pro informaci je zde uveden celkový počet potřebných měření. Po stisknutí tlačítka OK se zobrazí celkové rozhraní kalibrace tlaku (obr. 6).



Obr. 6 Kalibrace tlaku - uživatelské rozhraní

V levé horní části obrazovky se zobrazuje aktuální tlak ve viskozimetru, jak je udáván tlakovým čidlem. Aktuální tlak v zesilovači nastavuje uživatel pomocí tlačítek +/- . Aktuální hodnota napětí je průměrnou hodnotou z 2 000 vzorků, které jsou v počítači zpracovávány s frekvencí 4 Hz. Při stisknutí tlačítka *Kalibruj* se запиše aktuální hodnota napětí do tabulky vpravo. Tabulka vlevo slouží pouze pro kontrolu a zobrazují se v ní výsledky minulé kalibrace. Ačkoli uživatel nastavil plánovaný počet měření na určitém tlaku, může jich provést více i méně. U každého tlaku musí být proveden stejný počet měření. Jednotlivá kalibrační měření lze mazat po jejich označení v tabulce. Po stisknutí tlačítka *Zobrazit graf* se na místě pravé tabulky zobrazí jednoduchý graf, kde jsou naměřená data proložena přímkou. Aktuální a předchozí kalibrace tlaku je barevně odlišena.

Pro povolení tlačítka *Konec kalibrace* se musí nejprve kalibrace zkontrolovat. Při kontrole se mohou objevit hlášky typu *error*. Při objevení této hlášky nelze kalibraci uložit. Druhým typem hlášky je *warning*. Ta nebrání uložení kalibrace. Pokud je uživatel s výsledky kalibrace spokojen, po stisknutí tlačítka *Konec kalibrace* se objeví dialogové okno, kde se může rozhodnout program ukončit a přepsat výsledky nebo program ukončit a výsledky nepřepsat. Zvolená akce se ihned vykoná a program se ukončí.

Kalibraci tlaku nelze průběžně ukládat. Při kalibraci se nesmí zavřít okno programu ani se nesmí program zpustit znovu. Obojí by vedlo ke ztrátě dat (před zavřením okna resp. před ukončením celého Matlabu je uživatel programem varován).

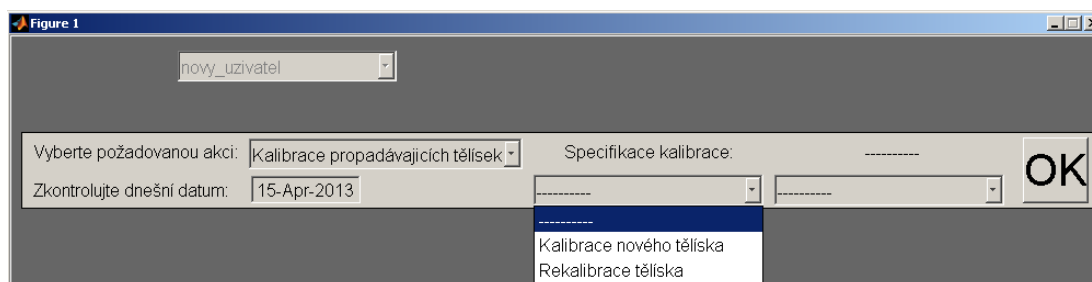
Kalibrace teploty

Ve vysokotlakém viskozimetru může být teplota měřena na dvou různých místech. Konstrukční provedení obou čidel je zcela identické a pro obě je využívána pouze jedna kalibrace. Přepínání mezi čidly probíhá mechanicky a program tato čidla nerozlišuje.

Způsob kalibrace i uživatelské rozhraní je zcela identické s kalibrací tlaku. Proto zde není tato část podrobněji popsána.

Kalibrace propadávajících tělísek

Program umožňuje vytvořit kalibraci pro prakticky neomezené množství tělísek a každé tělísko může mít neomezené množství rekalibrací. Pokud je výběr akce nastaven na kalibraci propadávajících tělísek, objeví se možnost dodatečné volby (obr. 7).

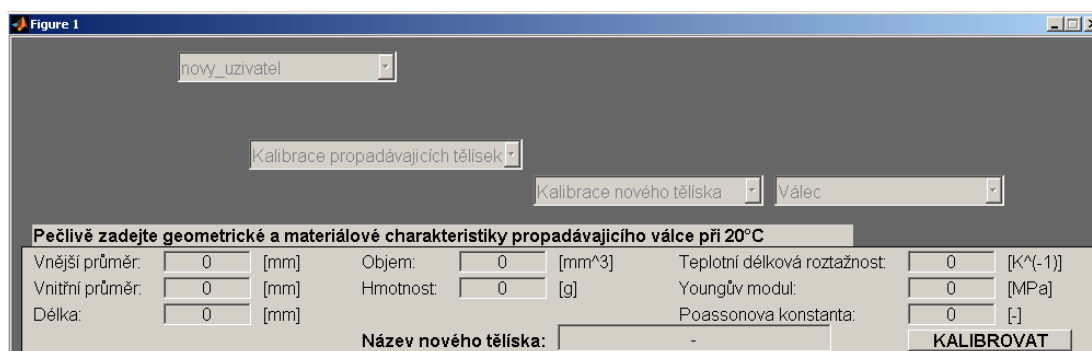


Obr. 7 Výběr akce - Kalibrace propadávajících tělísek

Uživatel má na výběr:

- Kalibrace nového tělíska: V druhém seznamu uživatel vybere, zda se jedná o válec nebo kouli,
- Rekalibrace tělíska: Zobrazí se jméno uživatele, který provedl první kalibraci (pokud není tento uživatel již smazán). Autor první kalibrace totiž zadává rozměry a vlastnosti tělíska.

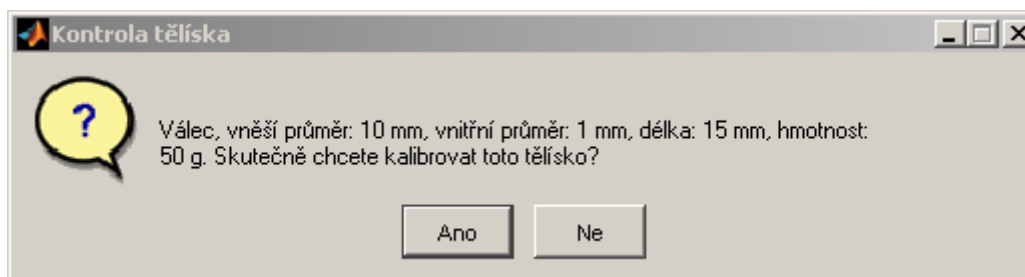
Po stisknutí tlačítka OK se zobrazí uživatelské rozhraní pro kalibraci tělísek, anebo prostor pro definování geometrických a materiálových vlastností tělíska (obr. 8).



Obr. 8 Kalibrace propadávajících tělísek - Nové tělísko (válec)

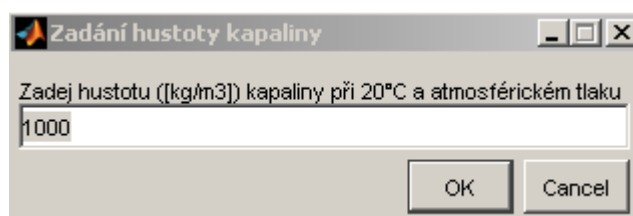
Na obr. 8 je zobrazena nová nabídka při kalibraci nového tělíska – válce. Hodnoty se zadávají s desetinnou tečkou (čárku program sám upraví). V názvu tělíska nesmí být interpunkce. Mezeru program nahradí podtržítkem. Pokud válec nemá axiální otvor, je vnitřní průměr válce 0. Jako délka se musí zadat skutečně maximální rozměr válce. Délka neslouží pro výpočet objemu válce, ale pro výpočet jeho rychlosti. Rozměry tělíska by měly být měřeny při 20 °C pro maximální přesnost výpočtů. Po stisknutí tlačítka *Kalibrovat* se rovněž zobrazí uživatelské rozhraní pro kalibraci tělísek.

Před povolením samotné kalibrace se program uživatele zeptá, zda chce skutečně kalibrovat vybrané tělísko (obr. 9).



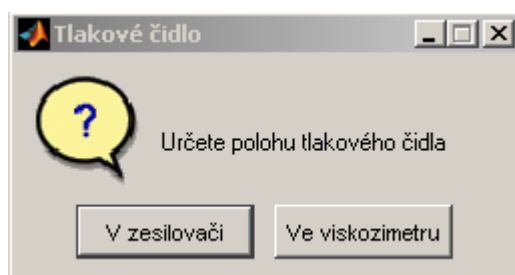
Obr. 9 Kalibrace propadávajících tělísek - Kontrola zvoleného tělíska

Rozměry tělíska, které musí uživatel potvrdit, program načtl ze souboru vytvořeného při první kalibraci tělíska. Do tohoto souboru se ukládají všechny následující kalibrace stejného tělíska. Po potvrzení správnosti vybraného tělíska musí uživatel zadat hustotu kapaliny při 20 °C a atmosférickém tlaku (obr. 10).



Obr. 10 Kalibrace propadávajících tělísek - Zadání hustoty kapaliny

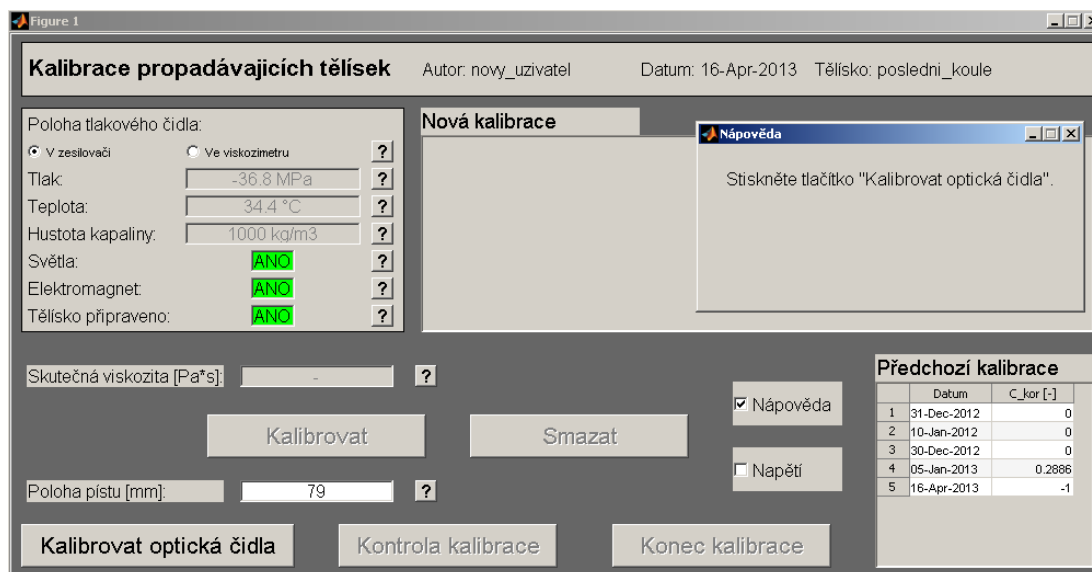
Po zadání hustoty kapaliny proběhne načtení kalibrace tlaku a teploty a zkontroluje se připojení měřicí karty. Uživatel musí zadat polohu tlakového čidla (zesilovač nebo viskozimetr) (obr. 11).



Obr. 11 Kalibrace propadávajících tělísek - Určení polohy tlakového čidla

Následně se zobrazí uživatelské rozhraní pro kalibraci propadávajících tělísek (obr. 12).

Uživatel je nejprve vyzván, aby zapsal polohu pístu při utěsnění vnitřního prostoru viskozimetru (optimálně při atm tlaku a teplotě 20 °C). Po zapsání počáteční polohy pístu, program spočítá počáteční objem kapaliny a její hmotnost. Hmotnost uloží a používá ji pro stanovování hustoty kapaliny při jakékoli změně polohy pístu.



Obr. 12 Kalibrace propadávajících tělísek - Uživatelské rozhraní

Objem je vypočítán součtem dílčích objemů ve vnitřním prostoru viskozimetru. Výpočet se liší i podle polohy tlakového čidla. Od objemu se mimo jiné odečítá objem kalibrovaného tělíska. Protože program zná hustotu kapaliny při 20 °C a atmosférickém tlaku, je pro maximální přesnost vhodné zapsat polohu pístu právě při 20 °C.

Po definování počáteční polohy pístu se aktivuje tlačítko *Kalibrovat optická čidla*. Po stisknutí tohoto tlačítka je uživatel vyzván, aby alespoň 5x vypnul/zapnul osvětlení. Program rozpozná, kdy je osvětlení zapnuto/vypnuto a v těchto intervalech počítá průměrné hodnoty napětí na zelené LED diodě. Když je fotodioda osvětlena, je na ní větší napětí než při přerušení paprsku. Účelem kalibrace optických čidel je stanovit hraniční hodnotu napětí na LED diodě. Pokud je poté napětí nižší, paprsek je přerušen, pokud je vyšší, světlo prochází bez překážky. Velikost napětí závisí na konkrétním umístění fotodiody, průhlednosti kapaliny a dalších okolnostech. Proto je potřeba kalibraci optických čidel provést na začátku každého měření a kdykoli, když detekce tělíska nepracuje správně.

V levé části uživatelského rozhraní je panel, ve kterém uživatel vidí aktuálně snímané hodnoty – velikost tlaku a teploty, hustotu kapaliny, informace o zapnutí světel a elektromagnetu a zda je tělísko drženo elektromagnetem. Pod otazníkem se vždy ukrývá vysvětlení k dané hodnotě/kontrolce. Kontrolka *Tělísko připraveno* nemusí vždy pracovat správně. Zejména na počátku měření nemůže program vědět, kde se tělísko nalézá. Po stisknutí tlačítka s otazníkem může uživatel ručně nastavit hodnotu této kontrolky. Rychlost aktualizace hodnot v této části je nastavena programem na 4 Hz. Maximální rychlosti vzorkování se využívá pouze při sledování napětí na LED diodách (tedy pro měření času). Čím vyšší je rychlost vzorkování, tím je vyšší přesnost měření rychlosti tělíska a viskozity.

Tabulka vpravo zobrazuje veškeré důležité hodnoty z aktuální kalibrace. Jednotlivá měření nemohou být upravována, ale mohou být mazána. Malá tabulka vpravo dole

ukazuje kalibrační konstantu z předchozích kalibrací. Při stisknutí tlačítka *Kontrola kalibrace* program zaktualizuje hodnotu kalibrační konstanty aktuální kalibrace.

V uživatelském rozhraní je dále zaškrťovací políčko *Nápověda*. Alespoň ze začátku je vhodné mít toto políčko zapnuto. Zobrazuje se zde postupně kompletní postup měření, detaily z pádu tělíska atd.. Pokud je okno nápovědy zavřeno, lze jej opět vytvořit zaškrtnutím daného políčka. Obdobné tlačítko je pro zobrazování aktuálních hodnot snímaných napětí. Tato funkce je k dispozici v případě, že byl program spuštěn z Matlabu. Pokud je toto políčko zaškrtnuto, a zároveň nejsou vykonávány jiné smyčky typu *Kalibrace* nebo *Kalibrace optických čidel*, tak se v příkazové řádce Matlabu zobrazují s frekvencí 4 Hz hodnoty snímaných napětí na všech šesti analogových vstupech měřicí karty.

Pro vlastní kalibraci musí uživatel stisknout tlačítko *Kalibrovat*. Následně je vyzván ke kontrole tlaku, teploty a kolmosti viskozimetru. Jakmile je vše zkontrolováno, může uživatel vypnout elektromagnet. Pro program je to okamžik, kdy tělísko začne padat a vynuluje časovače. V tu chvíli se tlačítko *Kalibruj* přemění na tlačítko *Stop*, kterým lze danou kalibraci softwarově kdykoli ukončit. Není-li kalibrace ukončena předčasně, v nápovědě se postupně zobrazuje délka pádu tělíska, doba zakrytí první diody, doba pádu tělíska mezi diodami, doba zakrytí druhé diody a celková doba pádu. Pokud je propadávajícím tělískem kulička, je možné měření ukončit po zakrytí pouze prvního čidla. Když kulička protne oba paprsky, program vypočítá celkem 3 různé rychlosti. U válcového tělíska musí být zakryta obě čidla, ale program přesto uloží pouze jednu hodnotu rychlosti (první a třetí nejsou u válce relevantní).

Jakmile uživatel stiskne tlačítko *Stop*, je vyzván, aby zapsal skutečnou hodnotu viskozity při daném tlaku a teplotě. Viskozimetrem může otočit a změřit hodnotu posunutí pístu. Když dojde ke změně posunutí, program nejen odečte příslušný objem, ale v závislosti na tlaku a teplotě vypočítá nové vnitřní rozměry viskozimetru. Kdyby měl být program použit pro jiné zařízení, musí splňovat podmínku, že se vysokotlaký válec skládá maximálně ze dvou různých materiálů, nebo by musela být tato část přeprogramována.

Tlačítko *Stop* se změnilo na *Potvrdit*. Po stisknutí začne program vyhodnocovat naměřené hodnoty. Když je propadávajícím tělískem kulička a v průběhu měření jsou zakryty obě fotodiody, program porovná první a třetí naměřenou rychlost. Pokud se přibližně shodují, konečná rychlost byla dosažena již před první závorou a program запиše do tabulky 3 měření. Pokud se neshodují, program запиše pouze poslední rychlost. Nejprve se ale ověří, jestli je tato rychlost přibližně konečná. Ověření je založeno na teoreticky maximální rychlosti kuličky v kapalině dané viskozity. Výpočet vychází ze silové rovnováhy a jsou do něho zahrnuty korekce vlivu stěn a setrvačnosti. Výpočet je pouze přibližný a tolerance je stanovena na 80 %. Kalibrační konstanta je pak jednoduše vypočtena pro každou hodnotu rychlosti zvlášť.

Válcové propadávající tělísko poskytuje přesnější výsledky viskozity. U každého tělíska se dá přibližně určit měřitelný rozsah. Kontrola rychlosti softwarově neprobíhá. Na rychlost pádu válce má ovšem podstatný vliv skutečná velikost

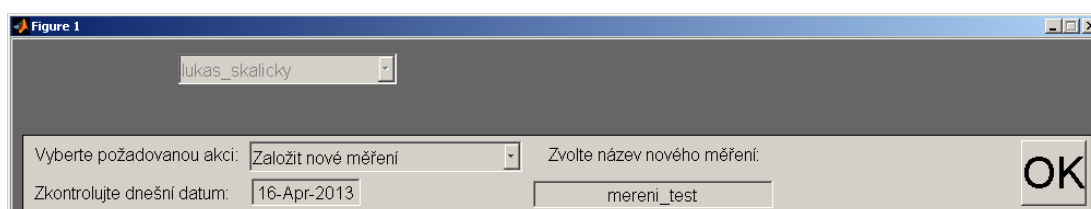
mezery mezi válcem a stěnou nádoby i skutečná velikost případného otvoru. Kalibrační konstanta je proto upravována pomocí korekcí popsanych v dalším odstavci.

Program nejprve vypočítá teoretickou hodnotu rychlosti válce na základě rozměrů tělíska a tlakové nádoby při referenční teplotě a tlaku. Referenční hodnoty byly stanoveny na 500 MPa a 20 °C. Rozměry tlakové nádoby i tělíska jsou proto přepočítány. Následně je stanovena teoretická rychlost při aktuální hodnotě tlaku a teploty. Z vypočtených teoretických hodnot se vytvoří poměr, kterým se vynásobí původní vypočítaná kalibrační konstanta. Takto konstanta je invariantní vzhledem k měnícímu se tlaku a teplotě.

Před ukončením kalibrace je nutné provést její kontrolu. Pokud nejsou splněny všechny podmínky prvního stupně kontroly (alespoň 10 měření, maximální odchylka vypočítaných konstant 10 %, ...), kalibrace není v pořádku (hláška *error*). Při splnění všech podmínek se hodnotí druhá kritéria (20 měření, 5 %, alespoň 2 různé tlaky, ...). Při druhém kole kontrol se zobrazují pouze hlášky typu *warning*. Kalibrace může být ukončena (tlačítkem *Ukončit kalibraci*), ikdyž se zobrazují varovné hlášky. Při ukončení kalibrace je uživatel tázan, jestli chce výsledky dané kalibrace uložit. Kalibrace se nedá průběžně ukládat. Při ukončení bez uložení, zavření okna programu nebo Matlabu (nejprve varovná hláška) nebo při opětovném spuštění programu, bude celá provedená kalibrace ztracena. Po uložení se data zapíší do příslušného souboru a při následujících měřeních může být daná kalibrace/rekalibrace použita. Všechny kalibrace tělísek jsou společné pro všechny uživatele. Program si pamatuje, kdo a kdy vytvořil danou kalibraci/rekalibraci.

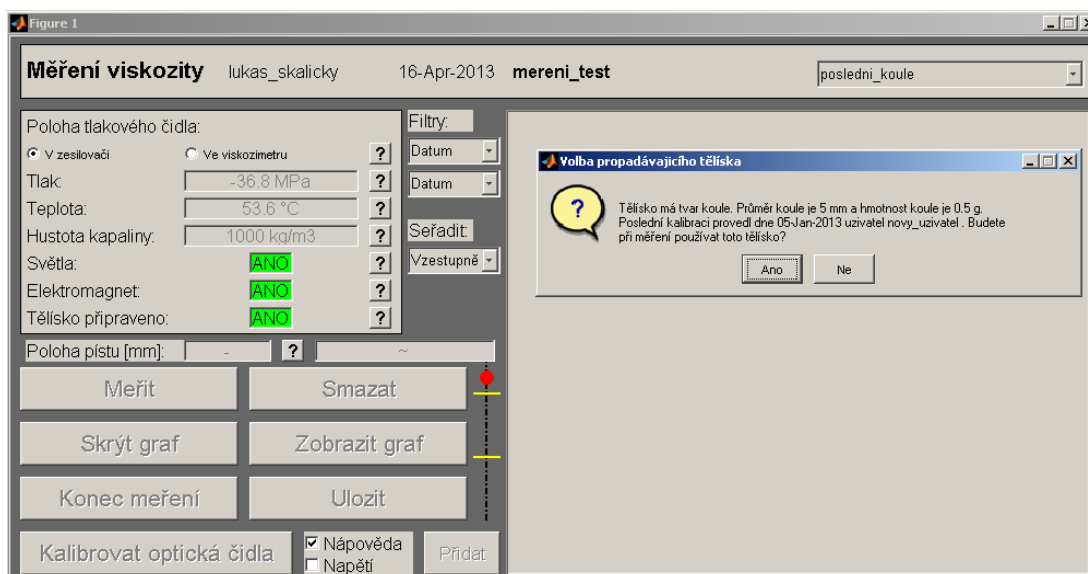
Založit měření

Pokud je výběr akce nastaven na hodnotu *Založit měření*, musí uživatel zadat název nového měření. Název nesmí obsahovat interpunkci. Případnou mezeru v názvu program nahradí podtržítkem.



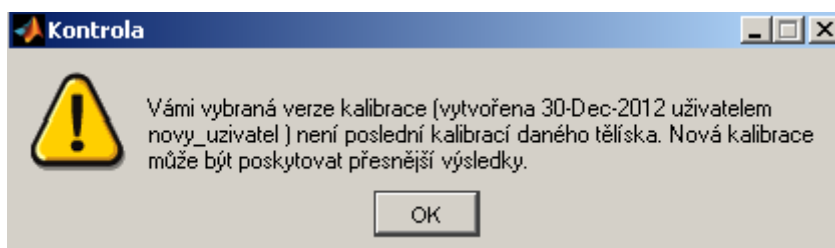
Obr. 13 Výběr akce - Založit nové měření

Po stisknutí tlačítka OK program vytvoří v uživatelské složce soubor měření a dva zálohové soubory. Následně se program pokusí připojit k měřicí kartě. Načtení kalibrace tlaku a teploty, zadání hustoty kapaliny a polohy tlakového čidla je stejné jako při kalibraci tělísek. Uživatelské rozhraní (obr. 14) je podobné kalibraci tělísek. Nejprve musí uživatel vybrat propadávající tělísko z rozbalovacího seznamu v pravém horním rohu.



Obr. 14 Založit nové měření - Uživatelské rozhraní - Výběr propadávajícího tělíska

Po vybrání tělíska se zobrazí dotaz (obr. 14), ve kterém program vypíše základní parametry tělíska pro kontrolu. Po utěsnění viskozimetru již tělesko nelze změnit (nelze jej vyměnit ani fyzicky). Potvrdí-li uživatel výběr daného tělíska volbou *Ano*, v rozbalovací nabídce se již nebudou zobrazovat jednotlivá tělíska ale jednotlivé kalibrace daného tělíska. Automaticky se nastaví poslední provedená kalibrace, ale uživatel se může rozhodnout pro používání jiné. Verze kalibrace tělíska může být změněna kdykoli v průběhu měření. Při pokusu o změnu verze kalibrace se nejprve zobrazí informace o autorovi dané kalibrace a datum, kdy byla tato kalibrace provedena. Pokud uživatel nevybere poslední verzi kalibrace, jsou informace v hlášce typu *warning*, protože měření s danou kalibrací nemusí být dostatečně přesné.

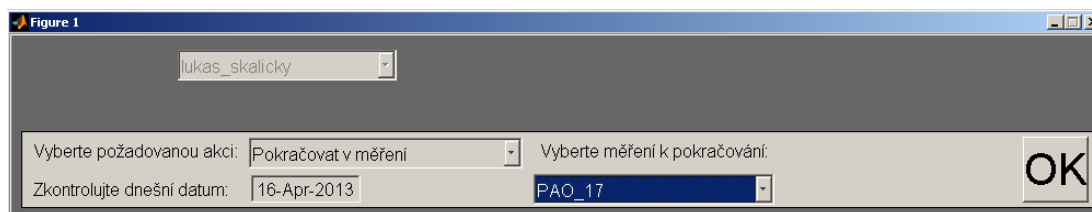


Obr. 15 Založit nové měření - Změna verze kalibrace

Po zvolení tělíska se zaktivuje pole pro zapsání počáteční polohy pístu. Princip výpočtu počátečního objemu a hmotnosti kapaliny je stejný jako u kalibrace tělísek. Následuje také kalibrace optických čidel.

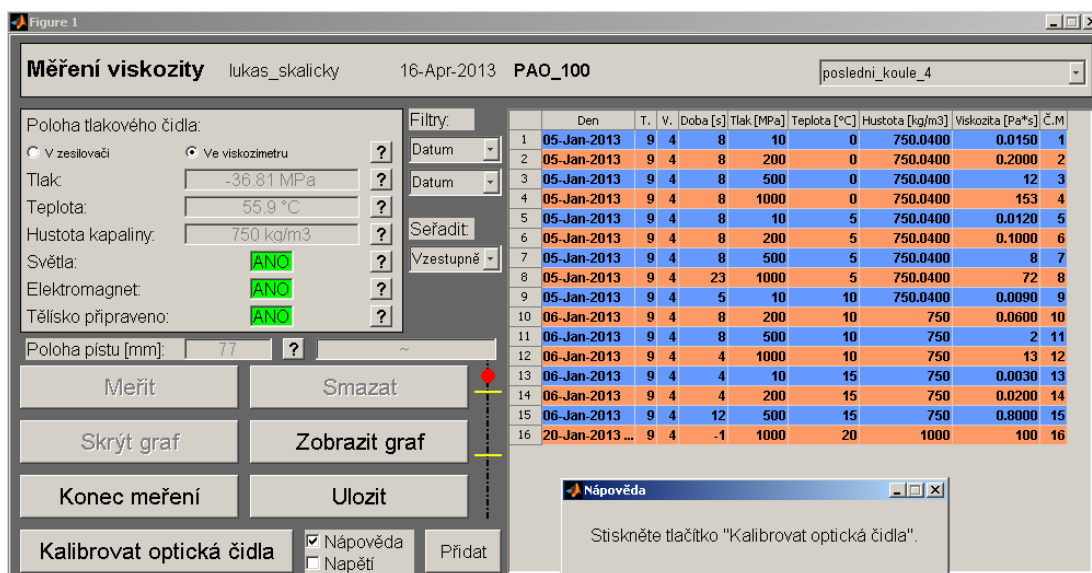
Samotné uživatelské rozhraní je složitější než u kalibrace tělísek. Pokud není provedeno alespoň jedno měření, nemůže uživatel přidat vlastní měření do tabulky. Podrobnější popis uživatelského rozhraní a způsobu měření je uveden v podkapitole *Pokračovat v měření*.

Pokračovat v měření



Obr. 16 Výběr akce - Pokračovat v měření

Po stisknutí tlačítka OK proběhne načtení předchozích měření, připojení ke kartě a načtení kalibrací. Program se uživatele zeptá, jestli byl viskozimetr od posledního měření rozebírán. Pokud nebyl, program načte hmotnost kapaliny ve viskozimetru, používané kalibrační tělísko, verzi kalibrace i poslední zadané posunutí pístu. Program pouze zobrazí informace o používaném tělísku a naposledy použité kalibraci tohoto tělíska. Pokud byl viskozimetr rozebírán, nebo nebylo uloženo žádné měření, je postup zadávání stejný jako u založení nového měření.

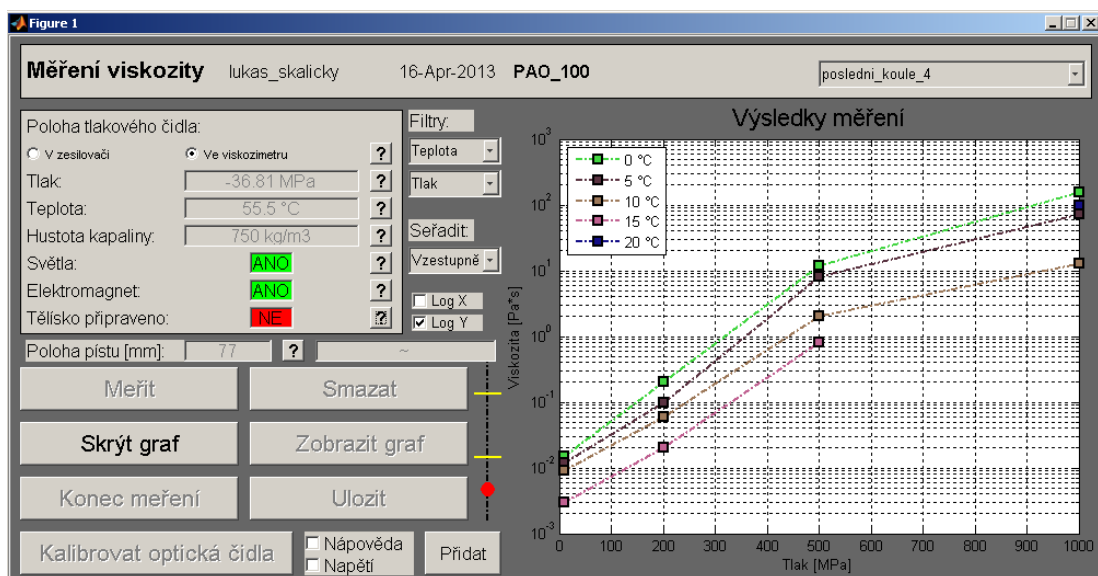


Obr. 17 Vlastní měření - Pokračovat v měření - Uživatelské rozhraní

V levé horní části uživatelského rozhraní je okno identické jako u kalibrace tělísek, ve kterém se zobrazují hodnoty veličin snímaných z měřicí karty. Kontrolka *Tělísko připraveno* funguje zcela identicky jako u kalibrace tělísek, ale u vlastního měření je přidáno grafické zobrazení polohy tělíska (červené kolečko). Tělísko je připraveno pouze tehdy, když se nachází v poloze uvedená na obrázku. Celkem má kolečko 5 různých poloh.

Mezi zmíněným oknem s informacemi a tabulkou obsahující výsledky měření se nacházejí filtry pro uspořádání dat v tabulce. Data mohou být uspořádána podle dne měření, teploty, tlaku, hustoty viskozity nebo propadávajícího tělíska. Pokud má více měření stejný primární znak (např. teplotu) data se v rámci teploty uspořádají ještě podle druhého zvoleného znaku. Třetí rozbalovací seznam slouží pro volbu sestupného/vzestupného uspořádání dat v tabulce.

Pokud jsou data v tabulce uspořádána podle teploty a tlaku, lze pomocí příslušného tlačítka zobrazit jednoduchý graf (obr. 18). Pod jednotlivými filtry se zobrazí 2 zaškrtnuté políčka. Při zaškrtnutí některého z nich se příslušná osa grafu změní na logaritmickou. V grafu je vždy zobrazena závislost viskozity na tlaku a data jsou rozdělena podle různé teploty. Graf slouží pouze pro hrubou představu výsledků měření. Pro publikaci výsledků je v programu vytvořeno vlastní prostředí (viz poslední kapitola).



Obr. 18 Vlastní měření - Zobrazení grafu

Pokud je zobrazen graf, jedinou možnou akcí uživatele je tento graf zase skrýt.

Pod grafickým ukazatelem polohy tělísky je tlačítko pro přidání libovolného bodu do tabulky. Toto tlačítko je vhodné pro přidání dat, která nejsou na daném zařízení měřitelná nebo byla zjištěna jiným způsobem. Uměle vytvořené měření zkopíruje hodnoty předchozího měření. Podle zobrazované doby měření lze poznat, že se jedná o uměle přidané měření (doba se zobrazuje jako záporná, viz obr. 17 poslední měření). Kopírování vlastností je důležité, protože každé měření si nese více důležitých informací.

Pokud uživatel označí jednu buňku v tabulce, povolí se možnost smazat dané měření (celý řádek) a v políčku vedle polohy pístu se zobrazí celá hodnota buňky (např. datum a čas). V tabulce není možné upravovat hodnoty měření.

Tlačítko *Měřit* lze stisknout, pokud jsou optická čidla zkalibrována. Měření se spustí, pokud je tělísky připraveno. Skutečný počátek měření pro program je opět okamžik vypnutí elektromagnetu. Postup měření je zcela stejný jako u kalibrace tělísek. Při měření je jedinou kontrolou dosažení maximální rychlosti porovnávání doby přerušení paprsků, když je propadávajícím tělískem kulička. V jiném případě není maximální rychlost kontrolována.

Po stisku tlačítka *Stop* (dříve *Měřit*) je uživatel vyzván ke kontrole a zapsání nové polohy pístu. Po stisku tlačítka *Potvrdit* (dříve *Stop*) se měření vyhodnotí. Pokud je

používaným tělískem koule, program zapíše jednu až tři naměřené hodnoty do tabulky. Pokud je tělískem válec jsou nejprve vypočítány rozměry válce a tlakové nádoby při daném tlaku a teplotě a při 500 MPa a 20 °C. Následně program vypočítá teoretickou rychlost při aktuálních a kalibračních hodnotách tlaku a teploty. Kalibrační konstanta tělíska je poté upravena pomocí poměru teoretických rychlostí. Po určení skutečné geometrie mezery program spočítá také hodnotu smykového napětí v kapalině mezi stěnou nádoby a tělískem. Smykové napětí, rychlost tělíska, použité kalibrační konstanty před a po korekci může uživatel vidět pouze při exportu dat do programu Excel (viz následující kapitoly).

Při vysokých viskozitách je doba pádu tělíska velmi dlouhá. Z tohoto důvodu je umožněno měření i při pádu tělíska v opačném směru. Po stisknutí tlačítka *Měřit* ve chvíli, kdy tělísko není připraveno, se program uživatele zeptá, jestli má povolit měření v opačném směru (u některých válcových tělísek s různými konci toto nemusí být možné). Pokud ano, tlačítko *Měřit* se změní na *Měřit opačně*. Po stisknutí tohoto tlačítka program ihned začíná měřit. Pokud je tělískem koule, může být pod oběma paprsky, mezi paprsky, anebo může právě zakrývat spodní paprsek. Pokud je tělískem válec, může být pod oběma paprsky nebo může zakrývat druhý paprsek.

Tlačítko *Měřit opačně* může uživatel zmáčknout, když je viskozimetr skutečně ve svislé poloze. Pokud během tohoto okamžiku dojde ke změně polohy tělíska (přerušeni nebo spojení paprsku světla), měření není možné. Stejná podmínka platí při normálním měření od stisku tlačítka *Měřit*, do vypnutí elektromagnetu. Tato podmínka kontroluje, jestli náhodou tělísko nespadlo samo a předčasně.

Do tabulky se nezapíše přesná hodnota teploty a tlaku. Teplota je zaokrouhlena na celé stupně a tlak na 0,1 MPa.

Výsledky měření může uživatel kdykoli uložit pomocí příslušného tlačítka. Pokud program ukončí před uložením, zavře hlavní okno Matlabu nebo spustí program znovu, veškerá naměřená data budou ztracena (ale ne nenávratně).

Odstranit měření

Tato možnost slouží pro vyčištění seznamu měření uživatele. Nejprve musí uživatel vybrat měření ke smazání z rozbalovacího seznamu. Po stisku tlačítka OK se objeví okno k potvrzení skutečného smazání. Pokud uživatel zvolí *Ano*, veškerá data, která byla v daném měření provedena, budou ztracena. Program nenávratně odstraní i zálohy daného měření.

Načít poslední zálohu

Po zvolení možnosti *Načíst poslední zálohu* musí nejprve uživatel vybrat název měření.

Poslední záloha daného se ukládá pokaždé, když uživatel provede nové měření, přidá nové měření, anebo smaže nějaké měření v tabulce. Pokud tedy uživatel zapomene před ukončením programu své měření uložit, může takto načíst zvolené měření ve stavu, v jakém jej opouštěl. Načtením zálohy se přeloží původní uložené měření a nelze se k němu vrátit (obsahuje stejná data jako záloha).

Po stisknutí tlačítka OK program pokračuje, jakoby se jednalo o akci *Pokračovat v měření*.

Načíst denní zálohu

Po zvolení možnosti *Načíst denní zálohu* musí nejprve uživatel vybrat název měření.

Denní záloha se ukládá při každém zvolení možnosti *Pokračovat v měření*, pokud bylo poslední uložené měření provedeno v jiný než dnešní den. Pokud uživatel chce pokračovat v měření, které provedl předchozí den, zvolí možnost *Pokračovat v měření*. V tu chvíli se uloží nová denní záloha. Uživatel pak například provede nějaká měření, ale poté zjistí, že dnes provedená měření jsou špatná. Daná měření smaže a program uloží. Pokud ale omylem smazal i některá dříve provedená správná měření, může pomocí denní zálohy načíst stav na začátku dnešního měření. K tomuto stavu se může vrátit kdykoli tento den, anebo v následující dny, pokud předtím v některý následující den nezvolí možnost pokračovat v měření.

Při načtení denní zálohy se opět přeloží dané měření podle zálohy a program se spustí, jakoby pokračoval v měření. Pokud by uživatel zvolil tuto možnost omylem, mohl by ztratit dnes provedená měření. Z tohoto důvodu je před načtením denní zálohy nejprve varován. Pokud by přesto zálohu načtl a až po načtení dat odhalil chybu, může program vypnout a načít poslední zálohu. Jestli ale po načtení denní zálohy už provedl nějakou akci typu měření nebo smazání měření, přeložila se i poslední záloha a data byla definitivně ztracena.

Publikace výsledků měření

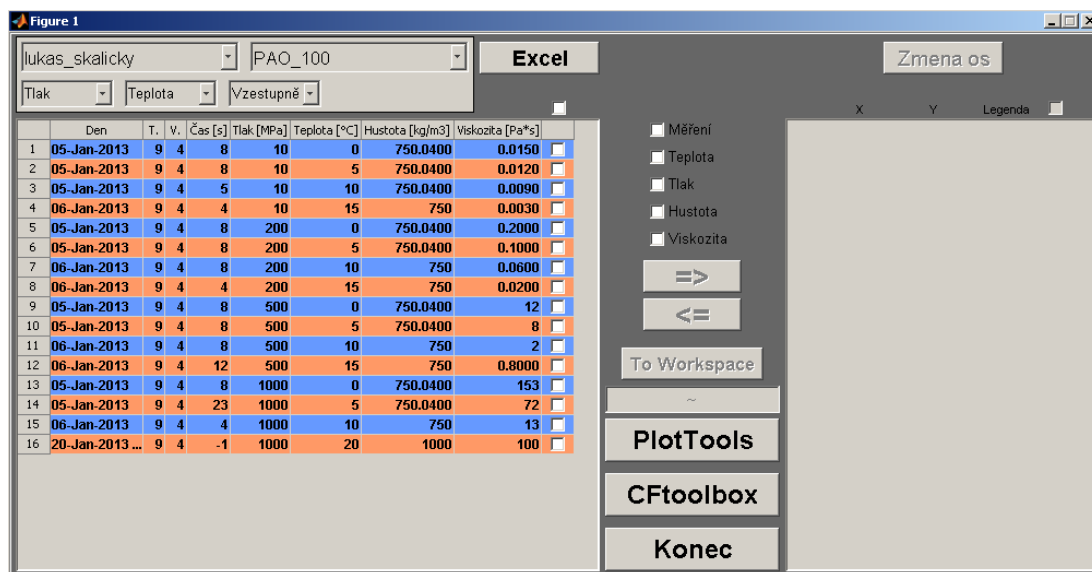
Poslední možná akce slouží k publikaci výsledků měření. Toto je s odstraněním měření jediná akce, ke které uživatel nepotřebuje připojit měřicí kartu.

Jednotlivé uživatelské účty v programu neslouží pro ochranu naměřených dat, ale aby každý mohl zasahovat pouze do svých měření. V této části programu uživatel může vidět a exportovat výsledky i ostatních uživatelů. Může je například porovnávat se svými daty.

V levé horní části uživatelského rozhraní je nutné vybrat uživatele a následně jeho měření k zobrazení. Ihned pod touto volbou jsou kritéria pro seřazení měření v tabulce (celkem zde jsou 2 tabulky, filtry ovlivňují shodně obě).

Jakmile je vybráno příslušné měření, mohou být výsledky exportovány do programu Microsoft Excel. Po stisknutí tlačítka *Excel* si může uživatel zvolit název souboru měření a jeho umístění.

Druhý možný export výsledků je do workspace Matlabu. Takto uložená data mohou být použita zejména pro interaktivní tvorbu grafů. Data pro export do workspace se zobrazují v pravé tabulce. K přesunutí slouží tlačítka se značkou šipky. Přesunou se vždy pouze označená data v tabulce vlevo. Nejprve ale musí uživatel zvolit, jaké informace o měření bude chtít exportovat. Na výběr je název měření, teplota, tlak, hustota a viskozita. Po zaškrtnutí libovolné kombinace tří možností je umožněn přesun dat mezi tabulkami.



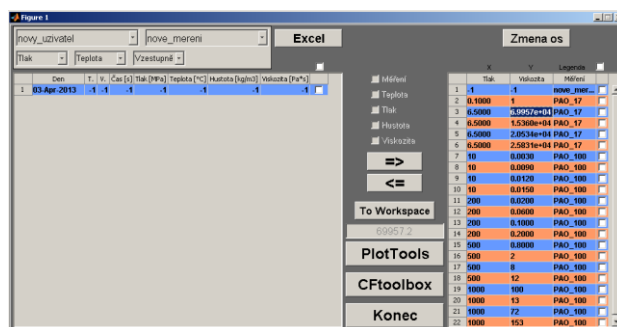
Obr. 19 Publikování výsledků měření - Uživatelské rozhraní - Výběr dat pro export do Excelu

Omylem se může stát, že některá data budou v tabulce vpravo zastoupena vícekrát. Program na tyto dvojice upozorní.

Jednotlivá data jsou náhodně rozmístěna do sloupců s označením *X*, *Y* a *Legenda*. Uživatel může sloupce přehazovat podle svého uvážení pomocí tlačítka *Změna os*.

Samotný export dat do workspace je zahájen stisknutím tlačítka *To Workspace*. Data jsou tříděna do proměnných podle shodného znaku v legendě. V každé skupině jsou data následně rozdělena na osy *x* a *y*. Názvy jsou automaticky generované a vyjadřují popis dané skupiny měření. Uživatel si může každou skupinu přejmenovat v okamžiku exportu dat. Pokud ještě není vytvořen žádný graf, program nabídne možnost data vykreslit automaticky. Tato možnost může výrazně urychlit práci. Pokud se při automatickém vykreslení neobjeví interaktivní prostředí, lze jej vyvolat v záložce *view* zašknutím *Figure Palette*, *Plot Browser* a *Property Editor*.

V programu jsou dále dvě tlačítka pro otevření různých prostředí pro práci s daty ve workspace. První tlačítko *PlotTools* otevře interaktivní prostředí pro tvorbu grafů. Druhé tlačítko *CFtoolbox* spustí knihovnu pro prokládání dat libovolnými křivkami. Tyto funkce nemusejí být dostupné ve všech verzích Matlabu.



Obr. 20 Publikace výsledků měření - Export dat do workspace - Ukázka výběru dat z více měření různých uživatelů

PŘÍLOHA 2: MATERIÁLOVÝ LIST KARBIDU



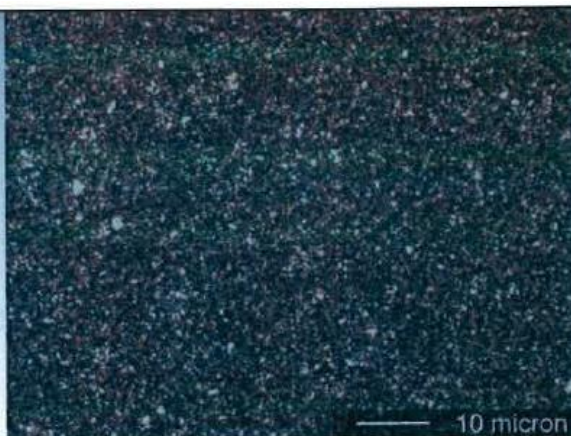
STANDARD GRADE DATA SHEET

GRADE : CTU17R
(KR15)
ISO Code :
US Industry Code :
Version : 13.1
Chemical composition

Element	weight %
Ni	8,5
WC	balance
other	1,40

Physical and mechanical properties

Average grain		ultrafine
Density (ISO 3369)	g/cm ³	14,55
Hardness (ISO 3878)	HV10	1760
Hardness (ISO 3878)	HV30	1730
Hardness (ISO 3738)	HRA	92,7
Transverse rupture strength (ISO 3327)	MPa	2500
Compressive strength	MPa	4900
Young's modulus	GPa	580
Fracture toughness (SEVNB)	MPa.m ^{1/2}	8,0
Thermal conductivity	Wm ⁻¹ K ⁻¹	85
Thermal expansion coefficient (20-400°C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5,1
Listed in the Inventory of effective food contact substance (FCS) notifications of the U.S. Food and Drug Administration (FDA)	FCN Nb	586 - 591

**Typical microstructure
(x1500)**


The data indicated in this sheet are typical material characteristic figures. They are nothing but target and not intended for the use as specifications.

CERATIZIT Luxembourg S.à r.l. Route de Holzem L-8201 MAMER LUXEMBOURG

Tel.(+352) 31 20 85 1 FAX.(+352) 311 911 www.ceratizit.com

PŘÍLOHA 3: ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OCELI

Zkoušky byly provedeny pro zjištění přesných mechanických vlastností materiálu vysokotlaké nádoby. Zkušební vzorky byly vyrobeny z čela největšího válce a prošly spolu s válcí identickým tepelným zpracováním. Ocel byla dodána s materiálovým certifikátem.

Zkoušky byly provedeny na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně pod vedením Doc. Ing. Libora Pantělejeva, Ph.D..

Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena s cílem odhalit případné tranzitní chování materiálu. Zkouška byla provedena celkem pro 6 vzorků při $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při pokojové teplotě. Z výsledků je patrné, že materiál v daném stavu je velmi křehký.

Zkuš. těleso	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	KV [J]
1	23	2,80
2	23	2,60
3	23	3,00
4	-30	1,16
5	-30	1,28
6	-30	1,09

Obr. 21 Zkouška rázem v ohybu – výsledky

Tahová zkouška

Tahové zkoušky byly provedeny opět pro 6 vzorků při $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pokojové teplotě. Cílem této zkoušky bylo zjistit mez pevnosti materiálu v tahu, smluvní mez kluzu, Youngův modul a tažnost.

Z výsledků je patrné, že k lomu materiálu došlo v elastické oblasti. Všechna zkušební tělesa se roztrhla na 3 části. Lom lze označit za nepředvídatelný. **Pevnost materiálu uvedená v protokolu zkoušky není skutečnou mezí pevnosti.** Jediným relevantním výstupem z tahové zkoušky je youngův modul, se kterým bylo počítáno v diplomové práci. Ostatní výsledky jsou zcela nepoužitelné a nevypovídají o skutečných mechanických vlastnostech daného materiálu.

Ohybová zkouška

Zkouška ohybem proběhla za stejných podmínek jako tahová zkouška. Protože při této zkoušce nebyly vzorky namáhány jednoosou tahovou napjatostí, nedocházelo k náhlým lomům a výsledky zkoušek lze použít pro pevnostní výpočty.

Z výsledků vyplývá, že mez pevnosti daného materiálu není výrazně ovlivněna teplotou. Průměrná hodnota pevnosti stanovená na základě šesti zkoušek je $1\,610 \pm 104$ MPa. S průměrnou hodnotou meze pevnosti bylo počítáno v pevnostních výpočtech.

Zhodnocení zkoušek mechnických vlastností

Nejdůležitější veličinou z hlediska bezpečnostního výpočtu vysokotlaké nádoby je mez pevnosti materiálu v tahu. Vzhledem k tvrdosti materiálu (58 HRC) by měla pevnost dosáhnout hodnoty přibližně 2 200 MPa. Provedené zkoušky vyčíslily mez pevnosti materiálu na 1 610 MPa při trojosé napjatosti. Pokud byly zkušební vzorky namáhány jednoosou tahovou napjatostí, docházelo k náhlému lomu při přibližně poloviční hodnotě napětí.

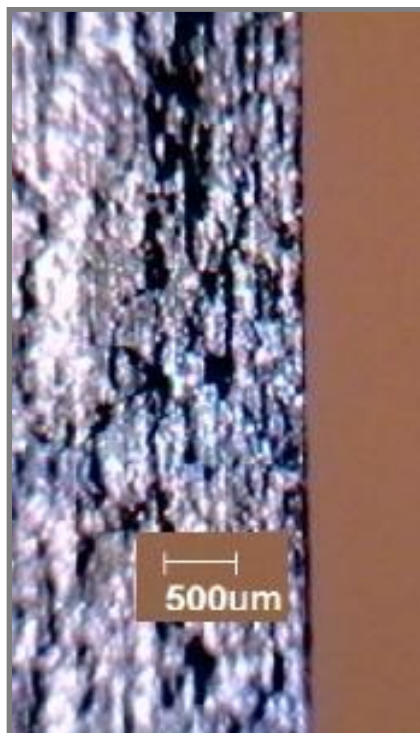
V samotném vysokotlakém válci vzniká jednoosá tahová napjatost pouze na vnějším povrchu vnějšího ocelového válce. I při započítání koncentrace napětí je tahové napětí v materiálu bezpečně nízké.

K porušení materiálu by mohlo dojít vlivem rázového zatížení. Protože v zařízení je tlak generován ruční pumpou, bude rychlost zatěžování vždy velmi nízká.

Výsledky zkoušek mohla paradoxně negativně ovlivnit snaha o jejich maximální přesnost. Pro výrobu vzorků byl z čela největšího válce vyříznut disk o tloušťce 10 mm a z něho byly vzorky následně vyrobeny. Tento způsob výroby způsobil, že vlákna vzniklá při tváření polotovaru nebyla ve vzorcích ve směru podélném ale příčném. Tím mohlo dojít ke zhoršení mechanických vlastností vzorků. V samotných válcích jsou vlákna uspořádána správně. Detaily lomových ploch a zkušebních těles jsou na obrázcích níže.



Obr. 22 Zkouška rázem v ohybu – Detail lomové plochy a V vrubu



Obr. 23 Zkouška rázem v ohybu – Detail lomové plochy



Obr. 24 Tahová zkouška - Detail lomové plochy



2013-03-29

Test report

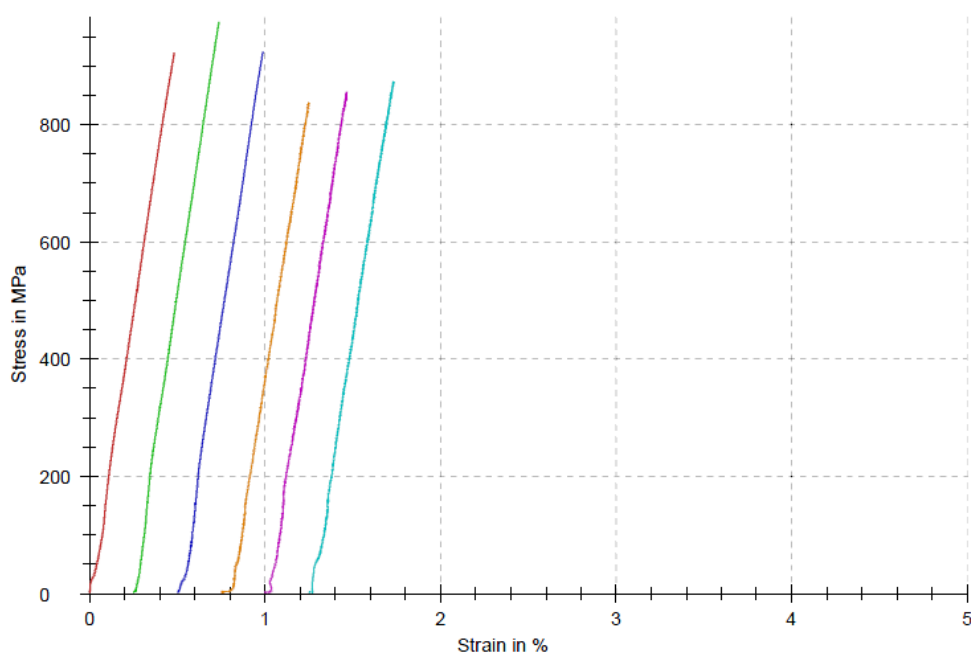
Heading : Tensile test
 Customer : Skalický
 Test standard : ČSN EN 10002-5
 Material : 19 573

Specimen type : Proportional cylindrical test specimen (6 x 30 mm)
 Tester : Institute of Materials Science and Engineering (L. Válka)
 Machine data : Zwick Z250 Allround-Line, tCII
 Load cell 150 kN
 Extensometr multixtens

Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _B MPa	A _g %	A _{gt (corr.)} %	A ₃₀ %	A _{t (corr.)} %	Z %
	1	23 °C	6	30,00	195	922	0,01	0,48	0,0	0,5	-
	2	23 °C	6	30,00	196	975	0,00	0,50	0,0	0,5	-
	3	23 °C	6	30,00	192	925	-0,00	0,48	-0,0	0,5	-
	4	120 °C	5,99	30,00	194	837	0,01	0,44	0,0	0,4	0
	5	120 °C	6	30,00	196	841	0,00	0,44	0,0	0,4	-
	6	120 °C	6	30,00	190	864	0,01	0,47	0,0	0,5	-

Series graph:





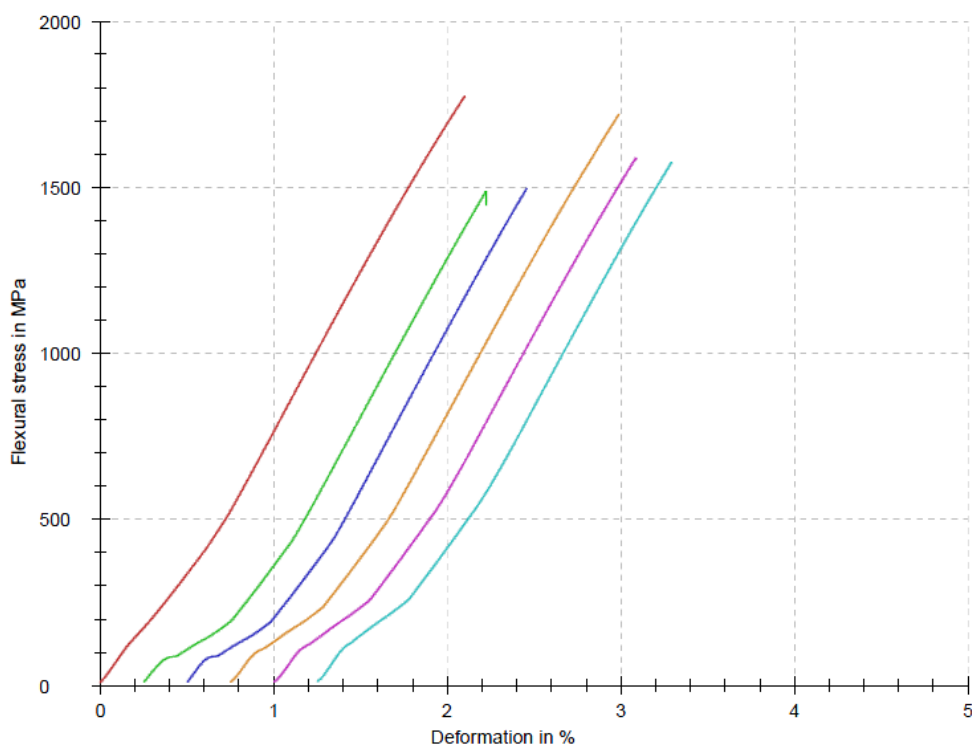
2013-05-03

Customer : Skalicky
 Test standard : 3-point flexure test
 Material : 19 573
 Specimen type : Flat specimen
 Tester : Institute of Materials Science and Engineering (L. Válka)
 Machine data : Zwick Z250 Allround-Line
 Load cell 150 kN

Pre-load : 50 N
 Test speed : 1 mm/min

Test results:

Legend	Specimen no.	Notes	F_M N	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	I_y mm
	1	20 °C	14900	1770	2,1	7,95	7,95	40
	2	20 °C	12500	1490	2,0	7,95	7,95	40
	3	20 °C	12500	1500	2,0	7,95	7,93	40
	4	120 °C	14500	1720	2,2	7,96	7,97	40
	5	120 °C	13300	1590	2,1	7,95	7,96	40
	6	120 °C	13100	1580	2,0	7,94	7,94	40

Series graph:

PŘÍLOHA 4: MANUÁL K HYDRAULICKÉ RUČNÍ PUMPĚ

RUČNÍ VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO JEDNOSTUPŇOVÉ PJ - 500

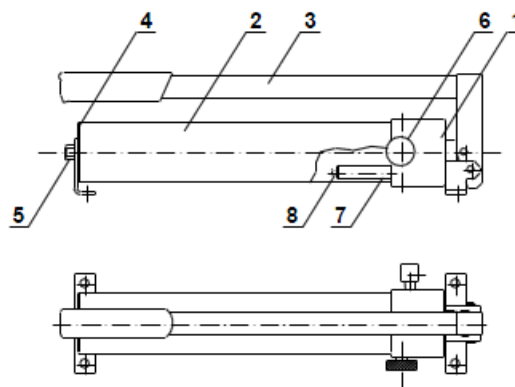
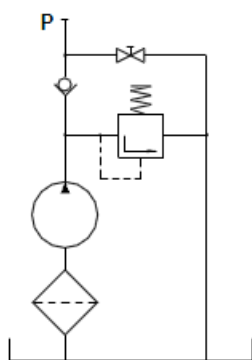
POUŽITÍ

Slouží jako zdroj tlakového oleje pro vysokotlaká hydraulická zařízení s jednočinným pracovním prostorem zejména pro víceúčelové hydraulické válce a jiné hydraulické nářadí.

TECHNICKÉ PARAMETRY

- | | |
|---|---|
| - maximální tlak na výstupu | 700 bar |
| - objem oleje v nádrži | 600 cm ³ |
| - užitečný objem oleje | 550 cm ³ |
| - geometrický (zdvihový) objem čerpadla | 2 cm ³ |
| - maximální síla na ruční páce | 400 N |
| - přepojení na hadici | závit 3/8" - 18NPT |
| - hmotnost bez oleje | 3,3 kg |
| - použitelný olej | minerální oleje pro hydrostatické mechanismy vizkozitní třídy 22, 32 popř. 46, z olejů české produkce doporučujeme hydraulický olej OH-HV 32 - filtrovat na 3 až 10 m |
| - použité hadice | DN 6, např. typ 2 SN, 2 ST dle DIN 20022. |

POPIS FUNKCE



Plnění olejové nádrže

Olejová nádrž je naplněná od výrobce. Druh oleje této náplně je uveden na dodacím listu. Při doplňování je nutno použít stejnou značku oleje nebo vyměnit celou náplň, popřípadě mísitelnost olejů konzultovat s výrobcem čerpadla nebo výrobcem olejů. Výměnu olejové náplně je nutno provádět 1x za 3 roky. Při výměně či doplnění oleje postupujeme takto:

- Uchopte čerpadlo tak, aby bylo ve svislé poloze tělesem 1 dolů
- Odšroubujte matici 5 a vyjměte víko 4 z nádrže 2. Postupujte opatrně, aby nedošlo vysunutí nádrže z tělesa 1 a rozliti oleje z nádrže.
- Nádrž plňte filtrovaným olejem 80 až 100 mm pod horní okraj nádrže. Filtrační schopnost filtru by měla být v rozmezí 3 až 10 µm.

- Při zpětné montáži víka 4 je nutno natočit víko tak, aby dosedací opěrné plochy víka a tělesa čerpadla 1 byly v jedné rovině.
- Po odvzdušnění čerpadla, hadice a spotřebičů (viz. bod 3.3) je nutné zkontrolovat hladinu oleje v nádrži a olej případně doplnit.

Připojení čerpadla na spotřebič

Připojení čerpadla na hadici je pomocí závitu 3/8"-18NPT (vnější závit na hadici) nebo přes redukci 3/8"- 18 NPT/M14x1,5 pomocí šroubení DN 6 M14x1,5 dle DIN 20078A. Požadujeme-li častou demontáž hadice z čerpadla je možno mezi čerpadlo a hadici vložit rychlospojku. Totéž platí o připoji hadice na spotřebič, kde požití rychlospojky je z důvodů vyměněny spotřebičů (např. víceúčelových válců, různých nosností a zdvihů) velmi vhodné, prakticky nutné. Při spojení pomocí rychlospojky se zástrčka zatlačí do zásuvky a ručně se našroubuje přesuvná matice. Při přepojování spotřebičů musí být píst spotřebiče zasunut ve válcí.

Odvzdušnění tlakové části čerpadla a spotřebiče

Po výměně oleje či demontáži, nebo při zavzdušnění v důsledku nedostatku oleje v nádrži, je nutno tlakovou část odvzdušnit.

Odvzdušnění čerpadla - povolte kolečko vypouštěcího ventilu 6 cca o 1/8 otáčky, čerpejte pomocí páky 3, přičemž čerpadlo je střídavě ve svislé poloze tělesem 1 dolů a v poloze vodorovné. Odvzdušnění tlakové části čerpadla poznáme zvýšením odporu na páce. Špatné odvzdušnění se projevuje částečným mrtvým chodem páky při čerpání oleje do spotřebiče (ventil 6 je v tomto případě již utažen).

Odvzdušnění spotřebiče a hadice - načerpejte olej do prostoru spotřebiče (viz bod 3.4) např. víceúčelového hydraulického válce. Válec nesmí být zatížen a nesmí být tlakován při vysunutí pístu na maximální hodnotu. Potom válec obraťte tak, aby přípoj na hadici byl v nejvyšším místě, tj. dnem vzhůru a ponechte cca 5 minut. V této poloze pak pístem vytlačte olej a zároveň vzduch z pracovního prostoru válce a hadice. Tento postup alespoň ještě jednou opakujte.

Práce s čerpadlem

Čerpadlo může pracovat od polohy svislé, tělesem 1 dolů, až do polohy vodorovné. Utáhněte ruční kolečko vypouštěcího ventilu 6 a pomocí páky 3 čerpejte olej do pracovního prostoru spotřebiče. Při zpětném zdvihu povolte kolečko vypouštěcího ventilu o jednu až dvě otáčky. Proti přetížení jsou čerpadlo i spotřebič chráněny pojistným ventilem, který je součástí čerpadla.

Čištění filtru

V sání čerpadla je umístěn filtr ze spékaného bronzu. Tento filtr slouží pouze k zachycení náhodných nečistot a nečistot vzniklých opotřebením a při plnění čerpadla filtrovaným olejem by se neměl zanášet.

V případě potřeby vyčištění je nutno demontovat nádrž a po odšroubování šroubu 7 sejmut kryt filtru 8 s vložkou. Vložku je možno vyprat v čistém technickém benzínu a vyfoukat vzduchem. Při montáži filtru je pak nutno kryt filtru natočit tak, aby sací otvory v krytu směřovaly dolů.

IČ: 00216305 DIČ: CZ00216305

Objednávka číslo: 3531300258
ze dne: 24.01.2013

Vyřizuje: Prof. ing. Ivan Křupka, Ph.D.
Telefon: +420541142723
e-mail: krupka@fme.vutbr.cz

IČ: 45536724 DIČ: CZ45536724

Dodavatel 117380

SOMA spol. s r.o.
B.Smetany č.p. 380
563 01 Lanškroun
Česká republika

Zboží dodejte na adresu:
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Odběratel-fakturační adresa
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Vysoké učení technické v Brně jako veřejná vysoká škola bylo zřízeno zákonem č. 111/1998 Sb. a nezapisuje se do obchodního rejstříku.

Číslo této objednávky prosím uvádějte na Vámi vystaveném daňovém dokladu! Děkujeme.

Datum dodání: **19.03.2013**

Měna objednávky: **CZK**

Text	Množství	Celk.vč.DPH	
těleso vysokotl. viskozimetru	1 KS	36.300,00	36.300,00
těleso vysokotlakého viskozimetru			
Temperační válec s přísl.	1 KS	38.720,00	38.720,00
Víko s těsněním	1 KS	33.880,00	33.880,00
Kostrý s průzorem	1 KS	29.040,00	29.040,00
zkušební vzorky	1 KS	10.890,00	10.890,00
válce dle č.v. A1-01	3 KS	22.990,00	68.970,00

Objednávka číslo: 3531300258

ze dne: 24.01.2013


Strana: 2 z 2

Celková hodnota objednávky včetně DPH:

217.800,00

Dodavatel této zakázky, která je hrazena z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR, je osobou povinnou spolupůsobit dle zákona č. 563/1991 Sb., o účetnictví a zákona č. 235/2004 Sb., o dani z přidané hodnoty, dále je osobou povinnou uchovávat doklady spojené s dodávkou a spolupůsobit při kontrole dle zákona č. 320/2001 Sb., o finanční kontrole, bez omezení, pokud k tomu bude vyzvána.

14. 02. 2013



Datum, jméno a podpis za VUT v Brně



ID: **00216305** VAT No.: **CZ00216305**

Purchase Order No.: 3531300259

date of 24.01.2013

Disposed: Prof. ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Phone No.: +420541142723

E-mail: krupka@fme.vutbr.cz

Vendor: 204720

CERATIZIT Luxembourg S.á r.l.

Route de Holzem B.P.51

Luxembourg

Luxembourg

Ship-to-address:

Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

Czech Republic

Invoicing address:

Brno University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Technická 2

616 69 Brno

Czech Republic

Will You please make a mention of our order number in your invoice and delivery documents

Delivery date: **10.03.2013**

Currency of order: **EUR**

Text	Qty	Price	
pouzdro	1 PC	450,00	450,00
pouzdro X1 02 D001 CTU17R			
pouzdro	1 PC	586,00	586,00
pouzdro X0 01 03D001 CTU17R			
pouzdro	4 PC	277,25	1.109,00
pouzdro X1 04D001 CTU17R			
pouzdro	1 PC	987,00	987,00
pouzdro X1 01D001 CTU17R			
těsnění	1 PC	1.000,00	1.000,00
těsnění X1-01-C			

Purchase Order No.: 3531300259

date of 24.01.2013

Page: 2 from 2

Total order value:

4.132,00

24.01.2013

Date and signature



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

IČ: 00216305 DIČ: CZ00216305

Objednávka číslo: 3521304855
ze dne: 06.11.2012

Vyřizuje: Prof. ing. Ivan Krupka, Ph.D.
Telefon: +420541142723
e-mail: krupka@fme.vutbr.cz

IČ: 25575589 DIČ: CZ25575589

Dodavatel 102900

KGF HYDRAULIKA s.r.o.
Heršpická 13
656 92 Brno-střed
Česká republika

Zboží dodejte na adresu:
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Odběratel-fakturační adresa
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

Vysoké učení technické v Brně jako veřejná vysoká škola bylo zřízeno zákonem č. 111/1998 Sb. a nezapisuje se do obchodního rejstříku.

Číslo této objednávky prosím uvádějte na Vámi vystaveném daňovém dokladu! Děkujeme.

Datum dodání: 15.11.2012

Měna objednávky: CZK

Text	Množství	Celk.vč.DPH	
ruční vysokotlaké čerpadlo PJ	1 KS	11.400,00	11.400,00
manometr	1 KS	1.800,00	1.800,00
vysokotlaká hadice 2m	1 KS	2.400,00	2.400,00

Celková hodnota objednávky včetně DPH:

15.600,00

06.11.2012

Datum, jméno a podpis za VUT v Brně



P íjatá objednávka

Dodavatel:	Doklad íslo: 02040002
KGf HYDRAULIKA s.r.o. Heršpická 758/13 61900 Brno-st ed Tel.: +420-543245870/ FAX: +420-543245870/ I O 25575589 DI CZ25575589	Odb ratel Vysoké u ení technické v Brn Fakulta strojního inženýrství Technická 2896/2 616 69 Brno I O 00216305 DI CZ00216305
Datum vystavení: 19.02.2013 Vy ídit nejd íve: 19.02.2013 Vy ídit do: 26.02.2013 Vystavil: Ku erová Milada Doprava: Platební podmínky:	

Ozna ení dodávky	Katalogové ozna ení	Po et M.J.	M.J.	Cena za M.J.	DPH %	bez DPH	s DPH
Zástr ka rychlospojky v etn krytky	ZM 3/8"	1,00	ks	515,00	21	515,00	623,15
Vsuvka 3/8" NPT	V103	1,00	ks	135,00	21	135,00	163,35
Zátka	Z 3/8"	1,00	ks	95,00	21	95,00	114,95
Rozd lova R3	R3	1,00	ks	320,00	21	320,00	387,20

Sleva %: 0,00		Základ	Výše DPH	V etn DPH
	Nulová sazba DPH	0,00	0,00	0,00
	Snížená sazba DPH % 15	0,00	0,00	0,00
	Základní sazba DPH % 21	1 065,00	223,65	1 288,65
	Celkem:	1 065,00	223,65	1 288,65

Cena celkem s DPH: 1 288,65 K

Registrace:
Zaps. v OR u KS Brno, od. C, vložka 34680

.....
razítko, podpis

Curtiss-Wright Flow Control (UK) Ltd
Napoleon House
Gore Cross BusinessPark, Corbin Way
Bridport, Dorset DT6 3UX UK
Tel: 44(0)1308 422256 Fax: 44(0)1308 427760
Registered in England No 4169258



PROFORMA
INVOICE

Original

Sold To:

FACULTY MACHINERY ENGINEERING
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
TECHNICKA 2896/2
BRNO, 61669
Czechoslovakia Rebulic

Deliver to:

FACULTY MACHINERY ENGINEERING
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
TECHNICKA 2896/2
BRNO, 61669
Czechoslovakia Rebulic

To download documents for Farris Pressure Relief Valve orders only, online, and up to ninety (90) days from shipment date:
1) Go to www.farrisengineering.com
2) Select "Order Tracking" feature at bottom of the homepage
3) Enter your "Customer Account" & "Sales Order" numbers as specified on this document
4) Click on "Order Documents" to download documents or "Sales Open Order" to view manufacturing status of this order

Cust. Acct.# : A01736
SALES ORDER : 402310
Order Date : 04-04-2013
P.O.# : 3531301136

SA/04-04-2013

Pos.	Quantity	Unit	Item	Project	Wh	Cnt	Price	Unit	Tax	Discount	Shipping Date

			Order Entered:			SA 04-04-2013					
			Export Order:			402310					
			Destination Code:			Czech 171					
			Schedule B: (Harmonized Code)			8413.91.90.50 (Spare Parts)					
			ECCN:			2B999j					
			Origin:			Swiss					

			Delivery terms:			DDP					
			Shipped by:			DHL					
			Shipping Marks :			3531301136					
			Packing Instructions:			Standard					
			Shipped From:			Bridport, Dorset, U.K.					
			Delivery Address:			Brno University of Technology Faculty of Mechanical Engineering Technicka 2896/2 61669 Brno, Czech Republic					



Page 2

Date: 04/04/13

04/04/13 15:58



Nabídka vydaná č.

NV122687

Odběratel:

Ústav konstruování FSI-VUT v Brně

Skalický Lukáš

Datum vystavení: 23.10.2012
 Datum platnosti od: 23.10.2012
 Datum platnosti do: 31.12.2012
 Způsob dopravy: Převážní služba
 Způsob platby: Dobírkou

Dobry den,

dekuji za Vasi poptavku a nabizim :

IČ :

DIČ :

	Označení dodávky	Počet	MJ	Cena za MJ	Sazba DPH	Sleva	Cena za MJ po slevě	Celkem bez DPH
1	O-kroužek NBR90Sh 68,00x4,00 - soustružený Kat. číslo:	15,00	ks	97,00	20%	0%	97,00	1 455,00
		Termín dodání: cca 3 dny						
2	O-kroužek NBR90Sh 9,60x2,40 (náhrada za 10x2,3) Kat. číslo:	15,00	ks	8,00	20%	0%	8,00	120,00
		Termín dodání: skladem						
3	O-kroužek NBR90Sh 9,00x1,50 (náhrada za 9x1,6) Kat. číslo:	15,00	ks	6,00	20%	0%	6,00	90,00
		Termín dodání: skladem						
4	O-kroužek NBR90Sh 8,00x2,00 Kat. číslo:	15,00	ks	6,00	20%	0%	6,00	90,00
		Termín dodání: skladem						
5	O-kroužek NBR90Sh 10,00x2,00 Kat. číslo:	15,00	ks	7,00	20%	0%	7,00	105,00
		Termín dodání: skladem						
6	O-kroužek NBR90Sh 10,00x2,50 Kat. číslo:	15,00	ks	9,00	20%	0%	9,00	135,00
		Termín dodání: skladem						

Cena bez DPH:

1 995,00 CZK

Sazba DPH	Základ	Výše DPH	Celkem
základní 20%	1 995,00	399,00	2 394,00
CELKEM	1 995,00	399,00	2 394,00

Rozpis DPH uveden v měně Kč

Při částce do 500,- požadujeme platbu hotově nebo na dobírku.
 Pokud je materiál nabízen v jednotkách kg, jedná se vždy o orientační množství. V případě objednávky bude účtováno dle skutečnosti.
 Změna množství na objednávce může mít za následek změnu ceny !
 Na objednávku prosím vždy uvádějte číslo nabídky !
 Pokud není uvedeno jinak, potom platí že v ceně položek není započtena cena dopravy. Meziprodej vyhrazen
 Děkujeme Vám za poptávku a těšíme se na další spolupráci.
 Minimální hodnota objednávky je 500 Kč, proto může být množství upraveno oproti Vašemu požadavku

VYSTAVIL - PODPIS

Vystavil: David Šindelář

www.sittech.cz

Vytiskl(a): David Šindelář